

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

Přímé řízení momentu asynchronního motoru  
Direct torque control of induction motor

2016

Bc. Matěj Franc

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Matěj Franc**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612T015 Elektronika  
Téma: **Přímé řízení momentu asynchronního motoru**  
**Direct Torque Control of Induction Motor**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor metod přímého řízení momentu asynchronního motoru.
2. Do řídicí jednotky s DSC TMS320F28335 implementujte vybranou metodu přímého řízení momentu asynchronního motoru.
3. V programu LabView vytvořte uživatelské prostředí pro komunikaci s řídicím systémem s možností sledování a modifikace důležitých parametrů a veličin realizované metody přímého řízení momentu.
4. Ověřte správnou činnost realizovaného algoritmu měřením nejdůležitějších veličin pohonu.

Seznam doporučené odborné literatury:

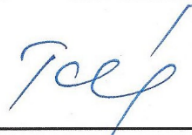
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Kuchař, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

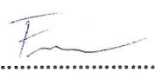
  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty



## Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 26.4.2016

Podpis 

## **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Martinu Kuchařovi, Ph.D. za poskytnutý čas a rady při zpracování mé diplomové práce.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je implementace vybrané Takahashiho metody přímého řízení momentu asynchronního motoru. Tato metoda bude aplikována v digitálním signálovém procesoru TMS320F28335 (Texas Instruments). Samotný text diplomové práce obsahuje v první kapitole úvod. V druhé kapitole je proveden teoretický rozbor metod přímého řízení momentu pro asynchronní stroje. Následuje popis stanoviště, kde probíhaly testy. Čtvrtá část se věnuje struktuře a vybraným detailům programu pro digitální signálový procesor napsaném v jazyce C. Následující pátá část se zabývá vytvořením uživatelského rozhraní pro komunikaci, zobrazování a nastavování veličin dané metody přímého řízení momentu v programu LabView. Poslední, šestá část obsahuje ověření činnosti realizovaného algoritmu měřením nejdůležitějších veličin motoru.

## **Klíčová slova**

Přímé řízení momentu, Digitální signálový procesor, Asynchronní motor, LabView, jazyk C

## **Abstract**

The target of this thesis is implementation of selected Takahashi method of direct torque control for induction motor. This method will be applied in the digital signal processor TMS320F28335 (Texas Instruments). The text of the thesis alone contains introduction in the first chapter. In the second chapter there is theoretical analysis of methods of direct torque control for induction machines described. Followed by a description of laboratory stand where the tests took place. The fourth part deals with the structure and program details for selected digital signal processor written in C language. The following fifth section deals with creating a user interface for communication, displaying and setting of values for the selected method of direct torque control in LabView. The last, sixth part contains verification operation of algorithm realized by measuring the most important values of the engine.

## **Key words**

Direct torque control, Digital signal processor, Induction motor, LabView, C programming language

## Seznam použitých symbolů

| Symbol                 | Jednotka            | Význam                                                                   |
|------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                        | [ot/min]            | Otáčky za minutu                                                         |
| $\underline{\psi}_1^S$ | [Wb]                | Vektor statorového magnetického toku                                     |
| $ \psi^S $             | [Wb]                | Modul statorového magnetického toku                                      |
| $\cos\phi$             | [-]                 | Účinník                                                                  |
| $f$                    | [Hz]                | Frekvence                                                                |
| $f_{VZ}$               | [Hz]                | Vzorkovací frekvence                                                     |
| $H$                    | [-]                 | Jednotka indukčnosti                                                     |
| HM                     | [Nm]                | Hodnota hystereze momentu motoru pro hysterezní regulátor                |
| HQ                     | [Wb]                | Hodnota hystereze statorového magnetického toku pro hysterezní regulátor |
| $I$                    | [A]                 | Proudu                                                                   |
| $i_{1\alpha}$          | [A]                 | Reálná složka statorového proudu                                         |
| $i_{1\beta}$           | [A]                 | Imaginární složka statorového proudu                                     |
| $I_{\max}$             | [A]                 | Maximální statorový proud tekoucí jednou fází motoru                     |
| $J$                    | [kgm <sup>2</sup> ] | Jednotka momentu setrvačnosti                                            |
| $M$                    | [Nm]                | Skutečný moment motoru                                                   |
| $M_z$                  | [Nm]                | Žádaný moment motoru                                                     |
| $P$                    | [kW]                | Elektrický výkon                                                         |
| $P_p$                  | [-]                 | Počet polpárů                                                            |
| $R_s$                  | [Ω]                 | Statorový odpor vinutí                                                   |
| SQ                     | [-]                 | Požadavek zvýšení/snížení statorového magnetického toku                  |
| ST                     | [-]                 | Požadavek zvýšení/snížení momentu motoru                                 |
| $t$                    | [ms]                | Čas                                                                      |
| $U$                    | [V]                 | Napětí                                                                   |
| $u_{1\alpha}$          | [V]                 | Reálná složka statorového napětí                                         |
| $u_{1\beta}$           | [V]                 | Imaginární složka statorového napětí                                     |
| $U_{\max}$             | [V]                 | Maximální napětí meziobvodu                                              |
| $\underline{u}_x$      | [-]                 | Spínací vektor ( $x = 0 \dots 7$ )                                       |
| $\psi_z$               | [Wb]                | Žádaný statorový magnetický tok                                          |
| $\psi_\alpha$          | [Wb]                | Složka statorového magnetického toku                                     |
| $\psi_\beta$           | [Wb]                | Složka statorového magnetického toku                                     |

## Seznam použitých zkratek

| Zkratka     | Anglický význam               | Český význam                                                         |
|-------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|             | Slave                         | Podřadný systém                                                      |
|             | Master                        | Nadřazený systém, který řídí Slave systémy                           |
| 12-DTC      | -                             | 12sektorová metoda přímého řízení momentu                            |
| ADC         | Analog-Digital Converter      | Analogově-digitální převodník                                        |
| AQ          | Action qualifier              | Modul vyhodnocení signálů                                            |
| CC          | Counter compare               | Komparační modul                                                     |
| CMPR        | Compare                       | Registr sloužící k porovnání                                         |
| DAC         | Digital-Analog Converter      | Digitálně-analogový převodník                                        |
| DB          | Dead Band                     | Modul bezpečnostních dob                                             |
| DBFED       | Dead-Band Rising Edge         | Bezpečnostní doba překlopení PWM kanálu                              |
|             | Delay                         | nástupnou hranou                                                     |
| DBRED       | Dead-Band Falling Edge        | Bezpečnostní doba překlopení PWM kanálu                              |
|             | Delay                         | sestupnou hranou                                                     |
| D-DTC       | -                             | Depenbrockova metoda přímého řízení momentu                          |
| DMA         | Direct Memory Access          | Přímý přístup do paměti DSP                                          |
| DSP         | Digital Signal Processor      | Digitální signálový procesor                                         |
| DTC         | Direct Torque Control         | Direct Torque Control (Přímé řízení momentu)                         |
| EMC         | Electromagnetic compatibility | Elektromagnetická kompatibilita                                      |
| ET          | Event trigger                 | Modul událostí a přerušení                                           |
| Flash paměť | -                             | Statická paměť typu ROM                                              |
| GND         | Ground                        | Napájecí zemní potenciál                                             |
| GUI         | Graphical User Interface      | Grafické uživatelské rozhraní                                        |
| HW          | HardWare                      | Fyzické, hmatatelné elektronické vybavení zařízení                   |
| IO          | Input/Output                  | Vstupně/výstupní                                                     |
| JTAG        | Joint Test Action Group       | Platforma pro testování plošných spojů                               |
| LabView     | -                             | Grafický programovací jazyk LabVIEW společnosti National Instruments |
| MT-DTC      | -                             | Modifikovaná Takahashiho metoda přímého řízení momentu               |

|         |                                 |                                                                               |
|---------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| např.   | -                               | Například                                                                     |
| PC      | Personal Computer               | Osobní počítač                                                                |
| PC      | PWM Chopper                     | Modul vysokofrekvenčního rozstřídání signálu                                  |
| PVN-DTC | -                               | Metoda přímého řízení momentu s přímým výpočtem vektoru napětí                |
| PWM     | Pulse Width Modulation          | Pulzně šířková modulace                                                       |
| ROM     | Read-Only Memory                | Typ paměti, který umožňuje pouze čtení dat                                    |
| SCI     | Serial Communications Interface | Sériové rozhraní určené pro komunikace DSP                                    |
| SHDW    | Shadow register                 | Stínový registr                                                               |
| SW      | SoftWare                        | Nehmatatelné programové vybavení zařízení                                     |
| TB      | Time Base                       | Submodul, který je součástí PWM modulu v DSP (časování PWM)                   |
| T-DTC   |                                 | Takahashiho metoda přímého řízení momentu motoru                              |
| TZ      | Trip Zone                       | Submodul, který je součástí PWM modulu v DSP (ochrana polovodičových spínačů) |
| USB     | Universal Serial Bus            | Univerzální sériová sběrnice                                                  |



# Obsah

|          |                                                           |           |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>                                               | <b>10</b> |
| <b>2</b> | <b>Teorie přímého řízení momentu asynchronního motoru</b> | <b>12</b> |
| 2.1      | Takahashiho metoda .....                                  | 13        |
| 2.2      | Ostatní metody přímého řízení momentu .....               | 17        |
| 2.2.1    | Depenbrockova metoda (D-DTC) .....                        | 17        |
| 2.2.2    | Modifikovaná Takahashiho metoda (MT-DTC) .....            | 18        |
| 2.2.3    | Dvanácti sektorová metoda (12-DTC) .....                  | 18        |
| 2.2.4    | Metoda s přímým výpočtem vektoru napětí (PVN-DTC) .....   | 18        |
| <b>3</b> | <b>Popis Stanoviště</b>                                   | <b>19</b> |
| 3.1      | Parametry motoru .....                                    | 19        |
| 3.2      | Parametry měniče .....                                    | 21        |
| 3.2.1    | Blokové schéma zapojení řídicí desky měniče .....         | 22        |
| 3.2.2    | DSP TMS320F28335 (Texas Instruments) .....                | 23        |
| <b>4</b> | <b>Struktura a popis kódu pro DSP v jazyku C</b>          | <b>24</b> |
| 4.1      | Blokový diagram programu .....                            | 24        |
| 4.2      | Přerušení od PWM modulu .....                             | 26        |
| 4.2.1    | Nastavení PWM modulů .....                                | 26        |
| 4.2.2    | Průběh zobrazující práci PWM modulu .....                 | 29        |
| 4.3      | Přerušení od dokončení převodu AD převodníkem .....       | 30        |
| <b>5</b> | <b>Grafické rozhraní v labview</b>                        | <b>32</b> |
| 5.1      | Popis programu v LabView .....                            | 32        |
| <b>6</b> | <b>Ověření činnosti realizovaného algoritmu</b>           | <b>35</b> |
| 6.1      | Rozběh motoru .....                                       | 35        |
| 6.2      | Zatěžování motoru .....                                   | 39        |
| 6.3      | Reverzace motoru .....                                    | 42        |
| <b>7</b> | <b>Zavěr</b>                                              | <b>45</b> |
|          | <b>Seznam příloh</b>                                      | <b>47</b> |

# 1 ÚVOD

V dnešní době se metody řízení asynchronních motorů pro dynamicky náročné aplikace větví do dvou skupin. Metody vektorového řízení a metody přímého řízení momentu. Tyto metody dokáží řídit motor na požadovaných hodnotách po dobu přechodných a ustálených stavů.

Hlavním požadavkem je použití spolehlivých motorů s vysokou účinností. Stejnoseměrné motory jsou postupně vytlačovány motory střídavými. Díky jejich jednoduché konstrukci jsou téměř bezúdržbové, což se o stejnosměrných motorech říct nedá. Střídavé motory lze použít do nebezpečných a výbušných prostředí, jelikož neobsahují mechanický usměrňovač – komutátor. Komutátor během rotace rotoru vytváří nežádoucí jiskření a tím i elektromagnetické rušení. Systém obsahující střídavý motor je obvykle řízen polovodičovým měničem. Na trhu lze nalézt mnoho výrobců, kteří se elektronice řízení elektromotoru a samotným motorům věnují.

V poslední době je rozšířené použití střídavých synchronních motorů s permanentními magnety. Tento typ motoru je nejčastěji použit v oblasti automatizace a robotiky, kde je především kladen nárok na účinnost, přesnost, spolehlivost, dynamiku a rozměry. Synchronní střídavé motory s permanentními magnety mají větší výhodu oproti ostatním motorům například v tom, že neobsahují budící vinutí. Dále mají menší moment setrvačnosti, menší hmotnost, vyšší účinnost a momentovou přetížitelnost.

Motory střídavé asynchronní jsou jednoduché na výrobu a nevyžadují téměř žádnou údržbu. Nejčastěji se skládají z trojfázového statorového vinutí připojeného k napájecí síti a rotorového vinutí zapojeného nakrátko. Maximální výkony tohoto typu asynchronního motoru se pohybují do 20 MW a maximální otáčky do 100 000 otáček/min. Existuje celá řada možností řízení tohoto typu motoru, např.:  $U/f$ , vektorové řízení, přímé řízení momentu, bezsenzorové řízení, metody řízení s odhadováním parametrů (MRAS), metody používající pozorovatele, metody využívající neuronové sítě, ...

Tato práce popisuje způsob přímého řízení momentu asynchronního motoru s rotorovým vinutím zapojeným nakrátko pomocí signálového procesoru TMS320F28335. Vývojový kit, který je použit vyvinula Katedra elektroniky. V práci je proveden teoretický rozbor aplikované Takahashiho metody DTC a popis laboratorního stanoviště s jeho důležitými součástmi. Aplikovaná Takahashiho metoda DTC vyžaduje větší výpočetní výkon. Regulaci motoru (vzorkovací frekvenci) je nutné nastavit přibližně v řádu jednotek kHz až desítek kHz. Problémy spojené s touto metodou řízení motoru jsou nabuzování motoru a reverzace momentu motoru. Během reverzace (požadavek na moment s opačným znaménkem) vznikají nežádoucí překmitý momentu, způsobující proudové a mechanické rázy. V textové části bude proveden popis částí

programu starajících se o nabuzení motoru před rozběhem a regulací překmitu momentu během reverzace motoru.

V diplomové práci je dále popis grafického uživatelského prostředí, vytvořeném v programu LabView, pomocí kterého se nastavují požadované parametry algoritmu řízení motoru a zobrazí i zpětnou vazbu uživateli. Na konci práce se zabývám ověřením činnosti řízení motoru Takahashiho metodou přímého řízení momentu. Nachází se zde rozbor průběhů důležitých veličin motoru při rozběhu a reverzaci motoru.

## 2 TEORIE PŘÍMÉHO ŘÍZENÍ MOMENTU ASYNCHRONNÍHO MOTORU

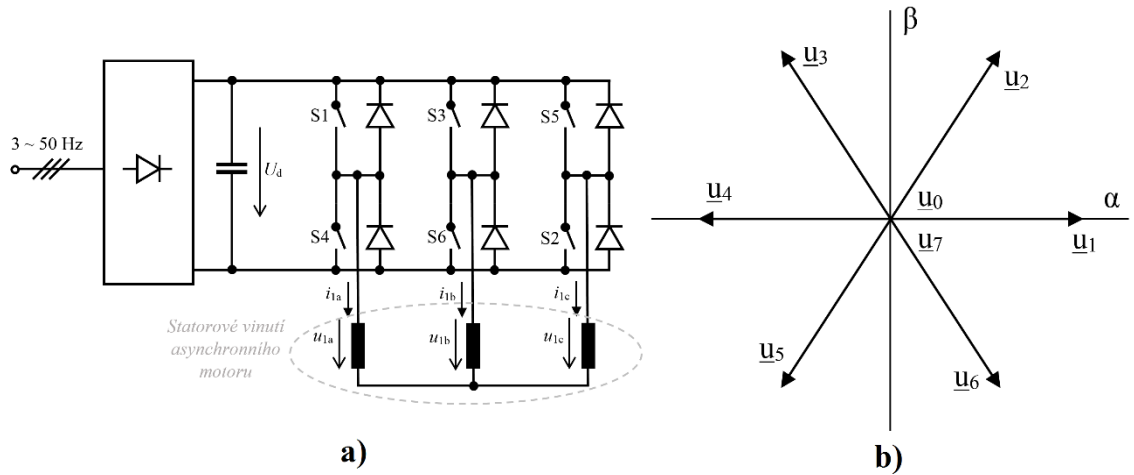
Tento způsob řízení motoru umožňuje přímo řídit jeho výstupní moment a statorový magnetický tok. Celému systému toto řešení dodá robustnost, dynamičnost a jednoduchost. Metoda je založena na rozdělení statorového souřadnicového systému pomocí napětíových vektorů na sektory. Spínáním napětíových vektorů  $\underline{u}_1$  až  $\underline{u}_6$  dochází k vytvoření točivého magnetického pole. Lze použít dva způsob jak regulovat výsledný moment motoru:

- Napětíové vektory  $\underline{u}_1$  až  $\underline{u}_6$  je vytvořeno točivé magnetické pole statoru. Koncový bod magnetického toku, který se pohybuje po určité délce trajektorie, a velikost integrovaného napětí určuje, maximální rychlost motoru. Tato rychlost je rovněž ovlivněna napětíovým úbytkem na statorovém odporu vinutí motoru. Aby byl moment motoru regulovatelný, je použito spínání nulových napětíových vektorů  $\underline{u}_0$  a  $\underline{u}_7$ , díky kterým moment motoru klesá (během jejich sepnutí je napětí mezi fázemi motoru teoreticky rovno 0 V). [2]
- Druhou možností regulace výstupního momentu je použití přepínání směru rotace vektoru magnetického toku statoru. Pokud bude směr rotace statorového pole shodný se směrem rotace rotoru, dochází ke zvyšování momentu. Požadavkem snížení momentu motoru dojde k vytvoření opačného směru magnetického pole statoru, a tím i k snižování momentu motoru. [2]

Již zmíněné napětíové vektory korespondují s kombinací sepnutých polovodičových přepínačů v měniči (tabulka 1.), zapojených podle obrázku 1.

*Tabulka 1. Přiřazené vektory napětí k dané spínací kombinaci [1, 2, 3]*

| Vektor napětí     | Sepnuté polovodičové přepínače                   |
|-------------------|--------------------------------------------------|
| $\underline{u}_0$ | S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>2</sub> |
| $\underline{u}_1$ | S <sub>1</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>2</sub> |
| $\underline{u}_2$ | S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>2</sub> |
| $\underline{u}_3$ | S <sub>4</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>2</sub> |
| $\underline{u}_4$ | S <sub>4</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>5</sub> |
| $\underline{u}_5$ | S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>5</sub> |
| $\underline{u}_6$ | S <sub>1</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>5</sub> |
| $\underline{u}_7$ | S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>5</sub> |



Obrázek 1. a) Schéma polovodičového měniče s napěťovým meziobvodem b) Rozložení napěťových vektorů ve statorovém souřadnicovém systému [2.]

## 2.1 Takahashiho metoda

Při použití Takahashiho metody přímého řízení momentu pracuje algoritmus se dvěma hysterezními regulátory. Jeden reguluje moment motoru a druhý statorový magnetický tok na požadovanou hodnotu. Regulátory v principu nastaví požadavek na zvýšení/snížení momentu motoru ( $S_T$ ) a požadavek na zvýšení/snížení statorového magnetického toku ( $S_Q$ ). Regulace probíhá v požadovaném hysterezním pásmu dle hodnot HQ (hystereze statorového magnetického toku) a HM (hystereze momentu motoru).

$$(\psi_z - |\underline{\psi}_1^s|) > HQ \rightarrow S_Q = 1 \quad (2.1.1)$$

$$(\psi_z - |\underline{\psi}_1^s|) < -HQ \rightarrow S_Q = 0 \quad (2.1.2)$$

$$(m_z - m) > HM \rightarrow S_T = 1 \quad (2.1.3)$$

$$(m_z - m) < -HM \rightarrow S_T = 0 \quad (2.1.4)$$

$$(m_z - m) < -HM \rightarrow S_T = 1 \quad (2.1.5)$$

$$(m_z - m) > HM \rightarrow S_T = 0 \quad (2.1.6)$$

Podle aktuálního směru otáčení a aktuálního sektoru, ve kterém se nachází aktuálně vektor statorového magnetického toku  $|\psi_s|$ , který se vypočítá z hodnot  $\psi_\alpha$  a  $\psi_\beta$  (obrázek 2. b)) dojde k selekci následující spínací kombinace (napěťového vektoru).

$$|\underline{\psi}_1^s| = \sqrt{\psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2} \quad (2.1.7)$$

Další podstatnou částí algoritmu je rekonstrukce napěťových složek statoru  $u_{1\alpha}$  a  $u_{1\beta}$  ze zvoleného napěťového vektoru a naměřeného napětí meziobvodu.

Tabulka 2. Rekonstrukce napětí dle zvoleného napěťového vektoru a napětí meziobvodu [1.]

| Vektor napětí                     | $\underline{u}_0$                                         | $\underline{u}_1$                                         | $\underline{u}_2$                                         | $\underline{u}_3$                                         | $\underline{u}_4$                                         | $\underline{u}_5$                                         | $\underline{u}_6$                                         | $\underline{u}_7$                                         |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Sepnuté<br>spínače<br>[kombinace] | S <sub>4</sub> ,S <sub>6</sub> ,S <sub>2</sub><br>[0,0,0] | S <sub>1</sub> ,S <sub>6</sub> ,S <sub>2</sub><br>[1,0,0] | S <sub>1</sub> ,S <sub>3</sub> ,S <sub>2</sub><br>[1,1,0] | S <sub>4</sub> ,S <sub>3</sub> ,S <sub>2</sub><br>[0,1,0] | S <sub>4</sub> ,S <sub>3</sub> ,S <sub>5</sub><br>[0,1,1] | S <sub>4</sub> ,S <sub>6</sub> ,S <sub>5</sub><br>[0,0,1] | S <sub>1</sub> ,S <sub>6</sub> ,S <sub>5</sub><br>[1,0,1] | S <sub>1</sub> ,S <sub>3</sub> ,S <sub>5</sub><br>[1,1,1] |
| $\underline{u}_{1a}$              | 0                                                         | $\frac{2}{3}U_d$                                          | $\frac{1}{3}U_d$                                          | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $-\frac{2}{3}U_d$                                         | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $\frac{1}{3}U_d$                                          | 0                                                         |
| $\underline{u}_{1b}$              | 0                                                         | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $\frac{1}{3}U_d$                                          | $\frac{2}{3}U_d$                                          | $\frac{1}{3}U_d$                                          | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $-\frac{2}{3}U_d$                                         | 0                                                         |
| $\underline{u}_{1c}$              | 0                                                         | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $-\frac{2}{3}U_d$                                         | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $\frac{1}{3}U_d$                                          | $\frac{2}{3}U_d$                                          | $\frac{1}{3}U_d$                                          | 0                                                         |
| $\underline{u}_{1\alpha}$         | 0                                                         | $\frac{2}{3}U_d$                                          | $\frac{1}{3}U_d$                                          | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $-\frac{2}{3}U_d$                                         | $-\frac{1}{3}U_d$                                         | $\frac{1}{3}U_d$                                          | 0                                                         |
| $\underline{u}_{1\beta}$          | 0                                                         | 0                                                         | $\frac{1}{\sqrt{3}}U_d$                                   | $\frac{1}{\sqrt{3}}U_d$                                   | 0                                                         | $-\frac{1}{\sqrt{3}}U_d$                                  | $-\frac{1}{\sqrt{3}}U_d$                                  | 0                                                         |

Velikost napětí při sepnutí napěťových vektorů dosahuje pouze dvou hodnot (při předpokládaném konstantním napětí meziobvodu  $U_d$ ):

$$|\underline{u}_0| \text{ a } |\underline{u}_7| = 0 \text{ [V]} \quad (2.1.8)$$

$$|\underline{u}_1| \text{ až } |\underline{u}_6| = \frac{2}{3} U_d \text{ [V]} \quad (2.1.9)$$

Složky  $\psi_\alpha$  a  $\psi_\beta$  jsou ze složek  $u_{1\alpha}$  a  $u_{1\beta}$  vypočítané a probíhá jejich integrace. Zároveň je zde odečten napěťový úbytek na odporu statorového vinutí  $R_s$ .

$$\psi_{1\alpha} = \int (u_{1\alpha} - R_s i_{1\alpha}) dt \quad (2.1.10)$$

$$\psi_{1\beta} = \int (u_{1\beta} - R_s i_{1\beta}) dt \quad (2.1.11)$$

Statorové složky proudu  $i_{s\alpha}$  a  $i_{s\beta}$ , jsou získané pomocí Clarkovy transformace (3 na 2). Transformace zobrazena (2.1.12).

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (2.1.12)$$

Skutečný moment motoru je počítán z počtu polpárů motoru, složek statorových proudů a složek statorového magnetického toku.

$$m = \frac{3}{2} P_p (\psi_{1\alpha} i_{1\beta} - \psi_{1\beta} i_{1\alpha}) \quad (2.1.13)$$

Pro sepnutí správného následujícího vektoru napětí je vytvořená spínací tabulka (tabulka 4.), které vybírá následující napěťový vektor dle požadavku pro snížení/zvýšení momentu motoru

( $S_T$ ) a statorového magnetického toku ( $S_Q$ ). Z důvodu zjednodušení algoritmu pro DSP je značení sektoru přeházené podle tabulky 3. Značení sektoru ve statorovém souřadnicovém systému je zobrazeno v i obrázku 2. a).

Tabulka 3. Rozmezí sektorů statorového magnetického toku

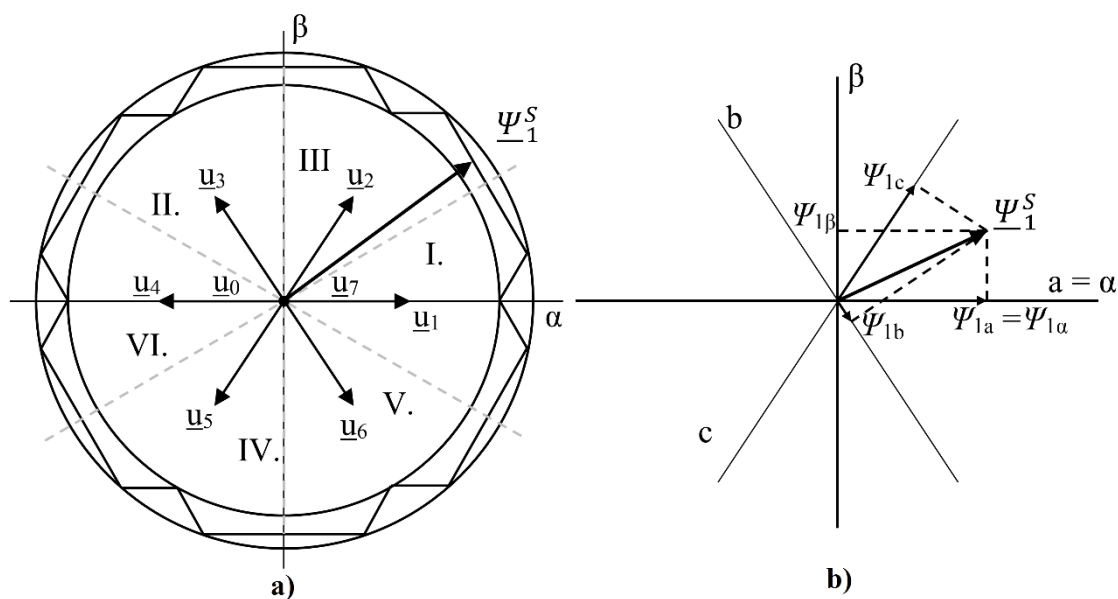
| Sektor | Rozmezí                           |
|--------|-----------------------------------|
| I.     | $-30^\circ \rightarrow 30^\circ$  |
| III.   | $30^\circ \rightarrow 90^\circ$   |
| II.    | $90^\circ \rightarrow 150^\circ$  |
| VI.    | $150^\circ \rightarrow 210^\circ$ |
| IV.    | $210^\circ \rightarrow 270^\circ$ |
| V.     | $270^\circ \rightarrow 330^\circ$ |

Tabulka 4. Výběr následujícího napěťového vektoru dle požadavku snížení/zvýšení statorového magnetického toku a momentu motoru [1.]

| SQ | ST | Sektor vektoru statorového magnetického toku |                   |                   |                   |                   |                   |
|----|----|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|    |    | I.                                           | III.              | II.               | VI.               | IV.               | V.                |
| 1  | 1  | $\underline{u}_2$                            | $\underline{u}_3$ | $\underline{u}_4$ | $\underline{u}_5$ | $\underline{u}_6$ | $\underline{u}_1$ |
|    | 0  | $\underline{u}_7$                            | $\underline{u}_0$ | $\underline{u}_7$ | $\underline{u}_0$ | $\underline{u}_7$ | $\underline{u}_0$ |
|    | -1 | $\underline{u}_6$                            | $\underline{u}_1$ | $\underline{u}_2$ | $\underline{u}_3$ | $\underline{u}_4$ | $\underline{u}_5$ |
| 0  | 1  | $\underline{u}_3$                            | $\underline{u}_4$ | $\underline{u}_5$ | $\underline{u}_6$ | $\underline{u}_1$ | $\underline{u}_2$ |
|    | 0  | $\underline{u}_0$                            | $\underline{u}_7$ | $\underline{u}_0$ | $\underline{u}_7$ | $\underline{u}_0$ | $\underline{u}_7$ |
|    | -1 | $\underline{u}_5$                            | $\underline{u}_6$ | $\underline{u}_1$ | $\underline{u}_2$ | $\underline{u}_3$ | $\underline{u}_4$ |

Z hlediska EMC rušení a spínacích ztrát, které generují polovodičové spínače spínáním, je vhodnější vybírat následující napěťový vektor (toto se především týká napěťových vektorů nulových), který se v kombinaci sepnutých polovodičových spínačů liší pouze v jedné fázi.

Takahashiho metoda DTC pracuje tak, že se koncový bod vektoru statorového magnetického toku  $\underline{\psi}_1^S$  pohybuje v mezikruží (Obrázek 2. a)). Střední hodnota poloměru mezikruží je trajektorií žádaného statorového magnetického toku. Z teoretického hlediska, pokud by byla nastavená hystereze regulátoru statorového magnetického toku na 0 Wb a vzorkovací frekvence  $f_{VZ}$  (frekvence regulace motoru) nekonečná, mezikruží by neexistovalo a trajektorie skutečného statorového magnetického toku by byla rovna trajektorii žádaného statorového magnetického toku.



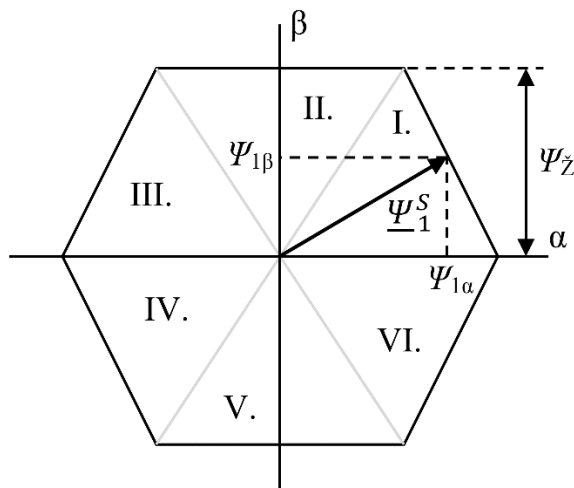
Obrázek 2. a) Zobrazení pohybu koncového bodu statorového magnetického toku v mezikruží a vektorové rozdělení prostoru na sektory b) Zobrazení složek statorového magnetického toku ve statorovém souřadnicovém systému (převzato z [2.]

Popis blokového schématu pohonu řízeného pomocí Takahashiho metody přímého řízení momentu (Obrázek 3.):

- **BT3/2** – Clarkové transformace
- **BTC** – Blok výpočtu momentu
- **BVA** – Blok výpočtu modulu statorového magnetického toku
- **BVR** – Blok rekonstrukce napětí
- **BSFC** – Blok výpočtu statorového magnetického toku
- **BSD** – Blok výpočtu sektoru
- **BSPS** – Blok výpočtu spínací kombinace
- **BSP** – Blok tvorby pulzů
- **TFC** – Neřízený usměrňovač
- **AM** – Asynchronní motor
- **Hysterezní regulátor statorového magnetického toku**
- **Hysterezní regulátor statorového momentu**
- **6 IGBT tranzistorů** (3 pro horní větev a 3 pro spodní větev)
- **Napěťový meziobvod**







Obrázek 4. Trajektorie pohybu statorového magnetického toku motoru [1.]

### 2.2.2 Modifikovaná Takahashiho metoda (MT-DTC)

Odlišnost této modifikované metody od Takahashiho metody je v tom, že jsou sektory statorového magnetického toku posunuty o  $30^\circ$  (samotné napěťové vektory rozdělují statorový systém souřadnic na sektory). Tímto posunem je docíleno odstranění nejednoznačných stavů, způsobených vektorem napětí, který se nachází v tomtéž sektoru statorového magnetického toku (není jednoznačné, zda dochází k snižování nebo zvyšování momentu). [1, 2]

### 2.2.3 Dvanácti sektorová metoda (12-DTC)

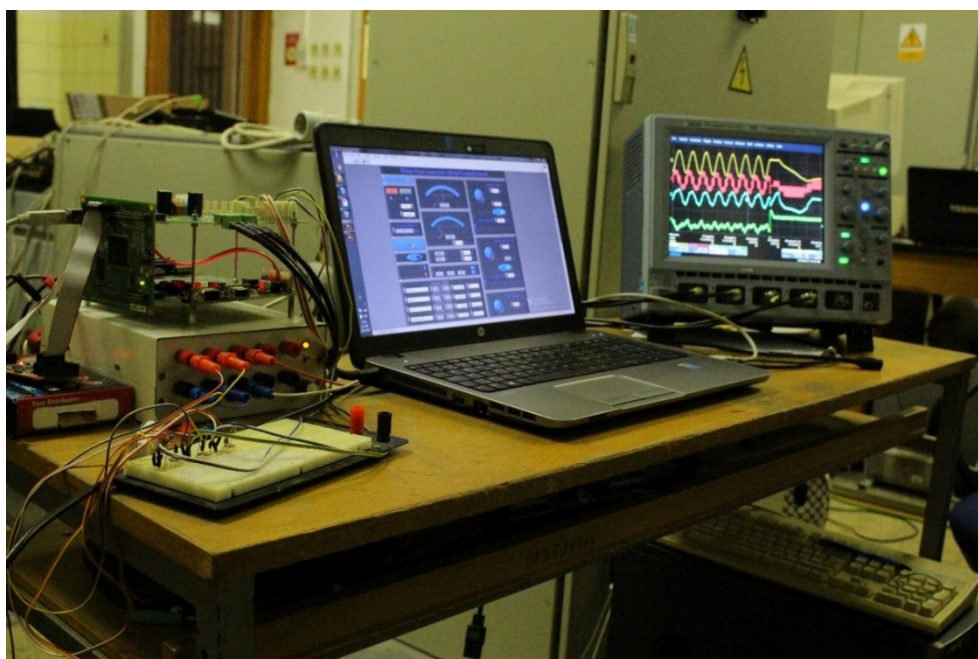
Statorový systém souřadnic je rozdělen na dvanáct sektorů (po inkrementech  $30^\circ$ ). Tato metoda dokáže ošetřit již zmíněné nežádoucí stavy s vektory napětí, nacházejícími se v aktuálním sektoru statorového magnetického toku. Využívá se hysterezních regulátorů se čtyřmi úrovněmi (hysterezní regulátor vyvolá požadavek: malé zvýšení momentu motoru, velké zvýšení momentu motoru, malé snížení momentu motoru a velké snížení momentu motoru). [1, 2]

### 2.2.4 Metoda s přímým výpočtem vektoru napětí (PVN-DTC)

Tato poněkud nová metoda nevyužívá k řízení trajektorie koncového bodu vektoru statorového magnetického toku spínací tabulky jako předešlé metody. Algoritmus vypočítává vektory  $g_1$  a  $g_2$ , a jejich vektorový součet je výsledný vektor napětí  $g$ . Vypočtený vektor  $g_1$  udává velikost nabuzení motoru a vypočtený vektor  $g_2$  určuje velikost momentu motoru (přesněji vektor  $g_2$  určuje hodnotu rychlosti otáčení vektoru statorového magnetického toku, což souvisí s výsledným momentem motoru). [1, 2]

### 3 POPIS STANOVISTĚ

Řízení asynchronního motoru pomocí metody přímého řízení momentu bylo odzkoušeno ve školní laboratoři. V laboratoři byl k dispozici asynchronní motor spojený rotorem ke stejnosměrnému motoru s budícím vinutím. Parametry asynchronního motoru jsou uvedeny v následující podkapitole. Připojený stejnosměrný motor slouží jako zátěž pro motor asynchronní (motor vpravo na obrázku 6.). Pro řízení motoru byl použit měnič, vyrobený katedrou elektroniky. Popis měniče je přiblížen v následujících kapitolách. Dalším použitým vybavením laboratoře byl čtyř kanálový osciloskop (LeCroy wave surfer 424), proudové sondy a multimetr.



Obrázek 5. Stanoviště v laboratoři

#### 3.1 Parametry motoru

Parametry asynchronního motoru jsou uvedeny v tabulce 5. Tento motor je fyzicky spojen pomocí hřídele s dalšími dvěma motory (stejnosměrný motor s budícím vynutím a asynchronní servomotor.

Tabulka 5. Parametry asynchronního motoru

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Jmenovitý činný výkon | 2,7 kW |
| Jmenovitý $\cos\phi$  | 0,75   |

|                                    |                                                            |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Jmenovité otáčky                   | 1360 <i>ot/min</i>                                         |
| Počet polpárů                      | 2                                                          |
| Jmenovitý moment                   | 19,0 <i>Nm</i>                                             |
| Momentová přetížitelnost           | 3,25                                                       |
| Jmenovitý moment setrvačnosti      | 0,013 <i>kgm<sup>2</sup></i>                               |
| Jmenovité statorové napětí         | 380/220 <i>V</i> , zapojení Y                              |
| Jmenovité rotorové napětí          | 108 <i>V</i> (sdružené při zapojení Y)                     |
| Jmenovitý statorový proud          | 7,51 <i>A</i>                                              |
| Jmenovitý rotorový proud           | 17,0 <i>A</i>                                              |
| Odpor fáze statoru                 | 1,83 $\Omega$ (studený stav); 2,10 $\Omega$ (teplý stav)   |
| Odpor fáze rotoru                  | 0,203 $\Omega$ (studený stav); 0,233 $\Omega$ (teplý stav) |
| Přepočtený odpor fáze rotoru       | 2,19 $\Omega$ (studený stav); 2,51 $\Omega$ (teplý stav)   |
| Celkový odpor v železe             | 570,3 $\Omega$                                             |
| Rozptylová indukčnost fáze statoru | 0,008 <i>H</i>                                             |
| Rozptylová indukčnost fáze rotoru  | 0,008 <i>H</i>                                             |
| Hlavní indukčnost                  | 0,129 <i>H</i>                                             |
| Jmenovitý statorový magnetický tok | 0,877 <i>Wb</i> (modul vektoru)                            |
| Jmenovitá magnetizační složka      | 6,80 <i>A</i>                                              |
| Jmenovitá momentotvorná složka     | 8,16 <i>A</i>                                              |
| Rotorová časová konstanta          | 54,6 <i>ms</i>                                             |

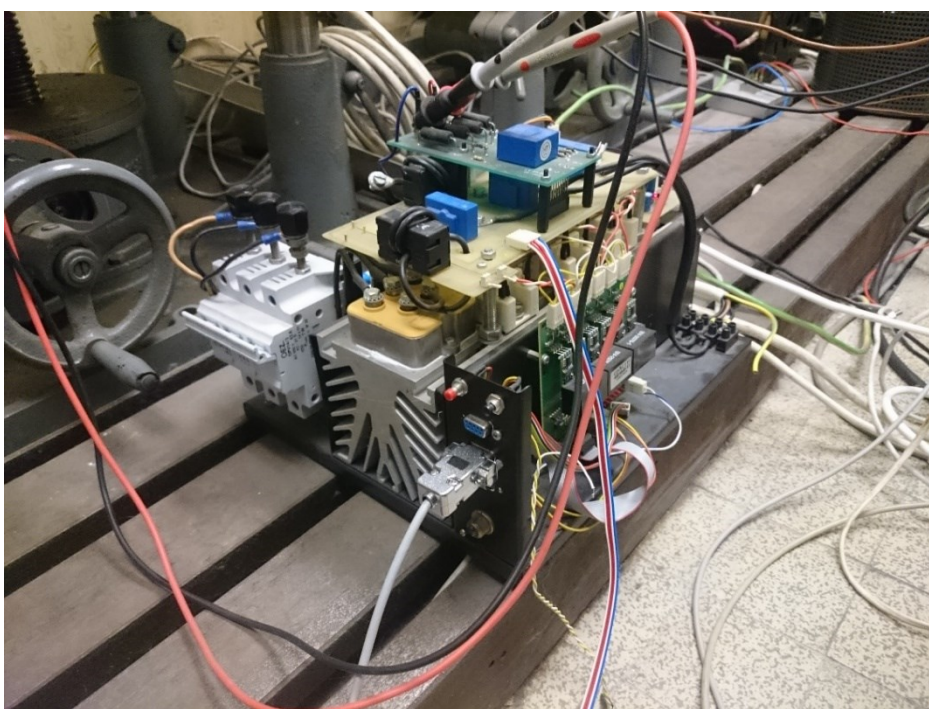


Obrázek 6. Použité motory v laboratoři (vlevo asynchronní motor, na kterém proběhly testy metody přímého řízení momentu, vpravo stejnosměrný motor použitý jako zátěž)

## 3.2 Parametry měniče

Použitý měnič obsahuje třífázový neřízený můstkový usměrňovač, napěťový meziobvod, tři dvojité bezpotenciální moduly s IGBT tranzistory zapojené jako trojfázový napěťový střídač (každý tranzistor opatřený zpětnou diodou), snímače fázových proudů motoru, výkonové budiče a řídicí elektroniku. Stručný popis parametrů měniče:

- Třífázový neřízený můstkový usměrňovač: SEMICRON SKD 50/12
- IGBT tranzistory: SEMICRON SKM 75 GB 123 D
- Budiče: CONCEPT 6SD106EI
- Snímače fázových proudů: LEM LV 25 - P
- Maximální vstupní napětí usměrňovače: 1600 V [11]
- Maximální vstupní proud usměrňovače: 60 A [11]
- Maximální blokovací napětí IGBT: 1200 V [10]
- Maximální kolektorový proud IGBT: 75 A [10]
- Maximální propustný proud nulovou diodou IGBT modulu: 75 A [10]
- Maximální spínací frekvence budičů: 100 kHz [9]

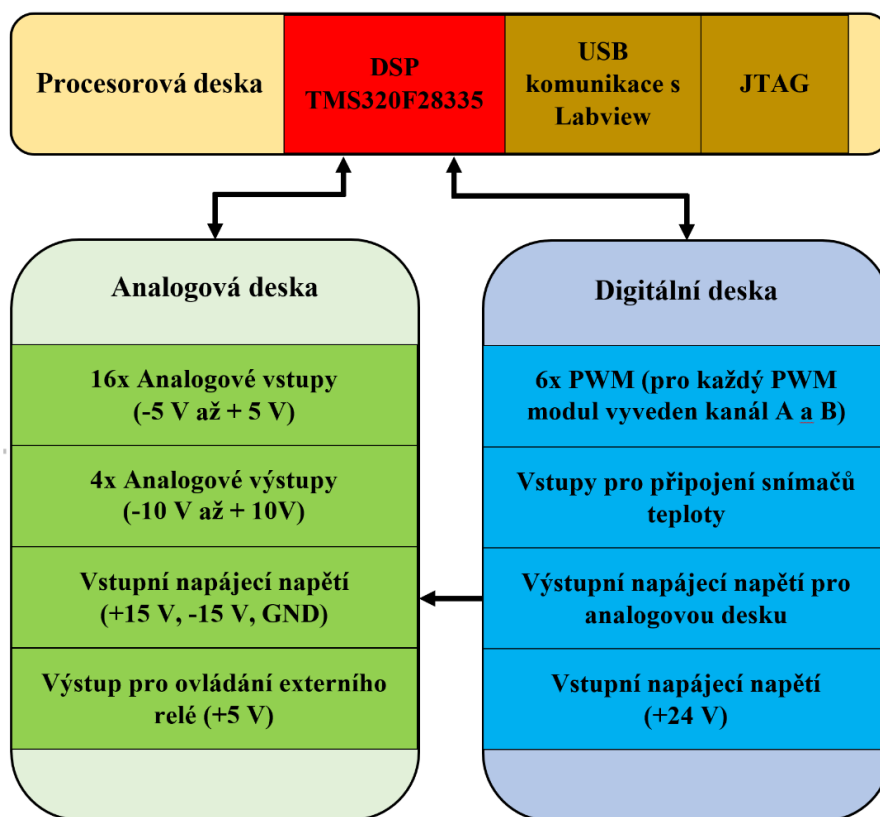


*Obrázek 7. Použitý měnič ve školní laboratoři*



### 3.2.1 Blokové schéma zapojení řídicí desky měniče

Řídicí deska měniče je složena z desky procesoru, analogové desky a digitální desky (blokové schéma zobrazeno na obrázku 8.). Na desce procesoru je osazen signálový procesor TMS320F28335 a jeho důležitá podpůrná elektronika (např.: krystal, obvody pro USB komunikaci s PC a JTAG). Analogová deska obsahuje konektory a elektroniku (úprava analogových napěťových hladin signálu) pro připojené snímané vstupní analogové napětí AD převodníku. Digitální deska obsahuje galvanicky (optočlenem) oddělené digitální IO (např. připojení PWM kanálů na vstupy budičů).



Obrázek 8. Blokové schéma řídicí desky měniče

### 3.2.2 DSP TMS320F28335 (Texas Instruments)

V řídicí elektronice měniče je použit digitální signálový procesor TMS320F28335 firmy Texas Instruments. Algoritmy měničů kladou vysoké požadavky na rychlost výpočtů, spolehlivost a univerzálnost. Použitý signálový procesor disponuje dostačujícím výkonem a možnostmi pro aplikace typu řízení motoru. Důležité parametry digitálního signálového procesoru TMS320F28335 [7]:

- Maximální taktovací frekvence jádra 150 *MHz*
- Napájecí napětí 1,9 *V* pro jádro a 3,3 *V* pro IO
- 32bitový procesor s Harvardskou architekturou
- 256K x 16 flash paměť
- Operace s plovoucí řadovou čárkou
- 18 PWM výstupů
- Interface pro připojení signálu enkodéru
- 3x 32bitové časovače
- Sériová komunikace: SPI, I<sup>2</sup>C, CAN, UART
- 12ti bitový AD převodník (16ti kanálový)
- JTAG

## 4 STRUKTURA A POPIS KÓDU PRO DSP V JAZYKU C

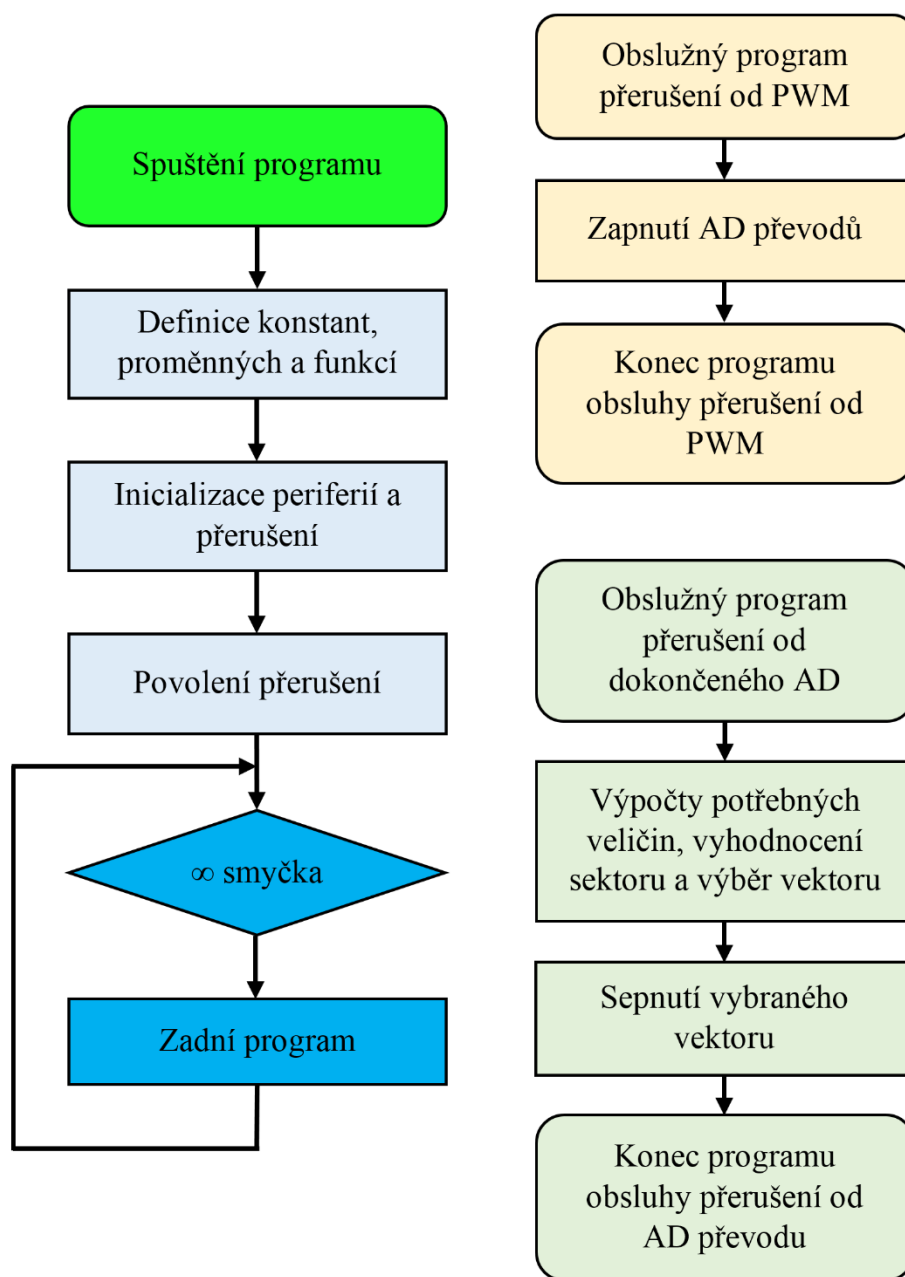
Při tvorbě programu je kladen důraz na funkčnost, přehlednost a optimalizaci. V aplikacích, kde je potřebná co nejkratší odezva při zpracování signálu, může hrát roli i jeden nevhodně umístěný řádek kódu s jednoduchou operací. Pokud se jedná o regulaci časově závislých veličin je potřebné přesné časování a synchronizace. Podstatnou funkcí digitálního signálového procesoru (kteréhokoliv procesoru) je přerušovací systém. Tento systém přerušení se týká, ve většině případech, HW časovačů, které nezávisle na jádru procesoru čítají do určité hodnoty a následně dochází k přerušení. Přerušení může být vygenerováno i komunikací, AD převodníkem, PWM modulem, vstupujícím externím signálem, čítačem a reakcí na změnu stavu nastavených veličin v procesoru. Díky této možnosti využití přerušovacího systému lze vhodným nastavením pro danou aplikaci docílit správného a bezpečného běhu programu a regulací. Konfigurací priorit přerušení zajistíme, že více důležité operace budou provedeny prvotně a ve zbytku času procesoru se vykonají operace méně důležité.

Hlavní struktura programu je po startu složena z: definování konstant a proměnných, inicializace periférií a přerušení, povolení přerušení a hlavního programu (zadního). Ve funkcích přerušení se provádí samotné zpracování signálů a regulace v zadané periodě.

### 4.1 Blokový diagram programu

Na obrázku 9. je blokový diagram algoritmu pro přímé řízení momentu motoru. Je zde hlavní část programu (od spuštění programu až po zadní program) a dvě přerušovací části programu (Obslužné programy pro přerušení od PWM a dokončení AD převodu).





Obrázek 9. Blokový diagram programu

Obecný popis jednotlivých bloků diagramu z obrázku 9.:

**Spuštění programu** – vytvořený program je (po provedené kontrole syntaktických chyb a překlepů) přeložen kompilátorem, zpracován preprocesorem, sestaven linkerem, debugován, přeložen do binárního kódu, nahrán do paměti procesoru a spuštěn.

**Definice konstant, proměnných a funkcí** – všechny konstanty, proměnné a funkce musí být před použitím nadeklarovány. Do konstant se uloží jejich hodnoty a proměnné lze

nastavit na výchozí hodnotu (aby nedošlo k neznámým stavům po prvotním spuštění programu).

**Inicializace periferií a přerušení** – zde je provedeno nastavení periferií na požadovanou funkci a požadovaný výsledek aplikace. Probíhá nastavení přerušení, jejich funkcí a i konfigurace samotného procesoru.

**Povolení přerušení** – po správném nastavení přerušení dochází v této části k povolení požadovaných přerušení.

**Nekonečná smyčka** – zacyklení nekonečné smyčky je provedeno pomocí funkce s nesplnitelnou podmínkou.

**Zadní program** – část kódu, která je cyklicky prováděna procesorem. Ve většině případech se zde nachází operace a funkce s nízkou prioritou (např. komunikace s uživatelem je méně důležitá než regulace proudu vinutím motoru). Čas v zadním programu = z většiny nevyužitý čas procesoru.

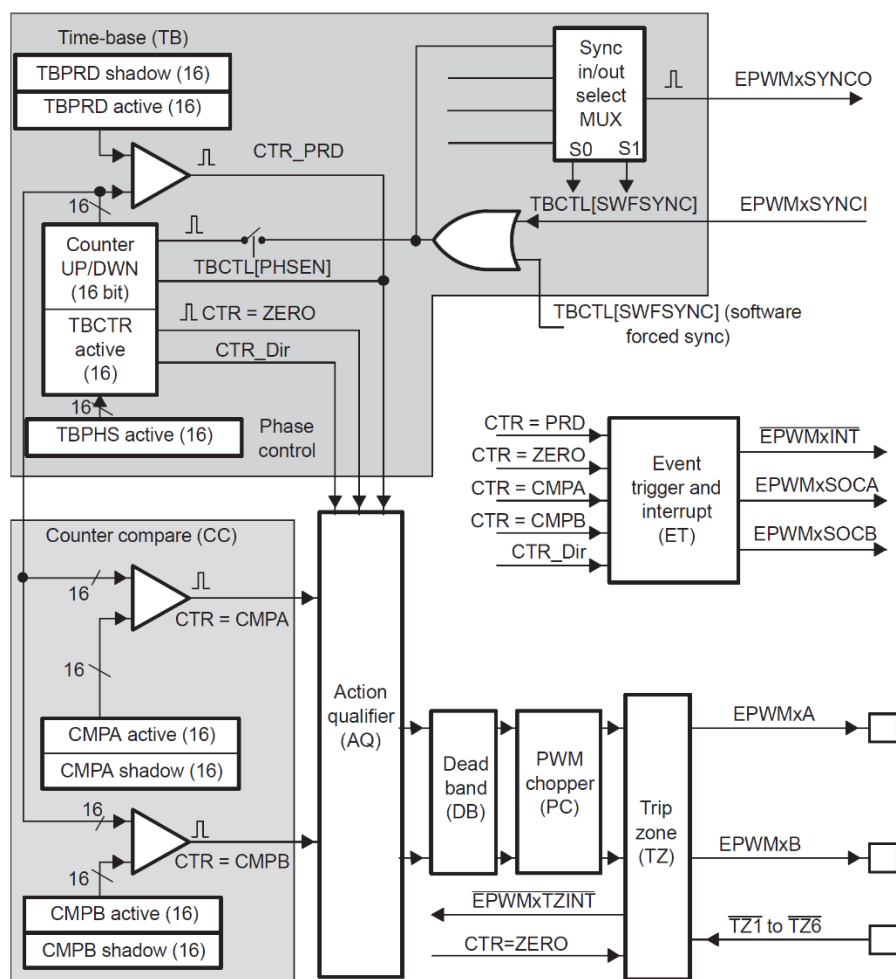
**Přerušení** – již vysvětleno na začátku této 4. kapitoly. Provedená regulace výstupních veličin (kapitola 4.3) na základě vstupních veličin a vnitřních proměnných procesoru.

## 4.2 Přerušení od PWM modulu

Požadavkem Takahashiho metody přímého řízení momentu je, aby docházelo k regulaci motoru v zadané periodě. Nejdůležitější částí programu pro DSP je tedy nastavení PWM modulů. Veškeré potřebné informace lze nalézt v katalogových listech výrobce [8.]. V této podkapitole je uveden stručný popis PWM modulu, nastavení PWM modulu a průběh vnitřních veličin PWM modulu s rozdělením času procesoru (obrázek 10.).

### 4.2.1 Nastavení PWM modulů

Algoritmus DTC využívá tři PWM moduly DSP. Blokové schéma jednoho PWM modulu je na obrázku 10. Každý PWM modul obsahuje časovou základnu TB, komparační moduly CC, vyhodnocovací jednotky pro oba PWM kanály AQ, modulu ochranných dob DB, PWM chopperu PC, spouštěče událostí a přerušení ET a vstupně-výstupního modulu TZ.



Obrázek 10. Blokové schéma jednoho PWM modulu [8.]

Popis funkce a nastavení částí PMW modulu z obrázku 10.:

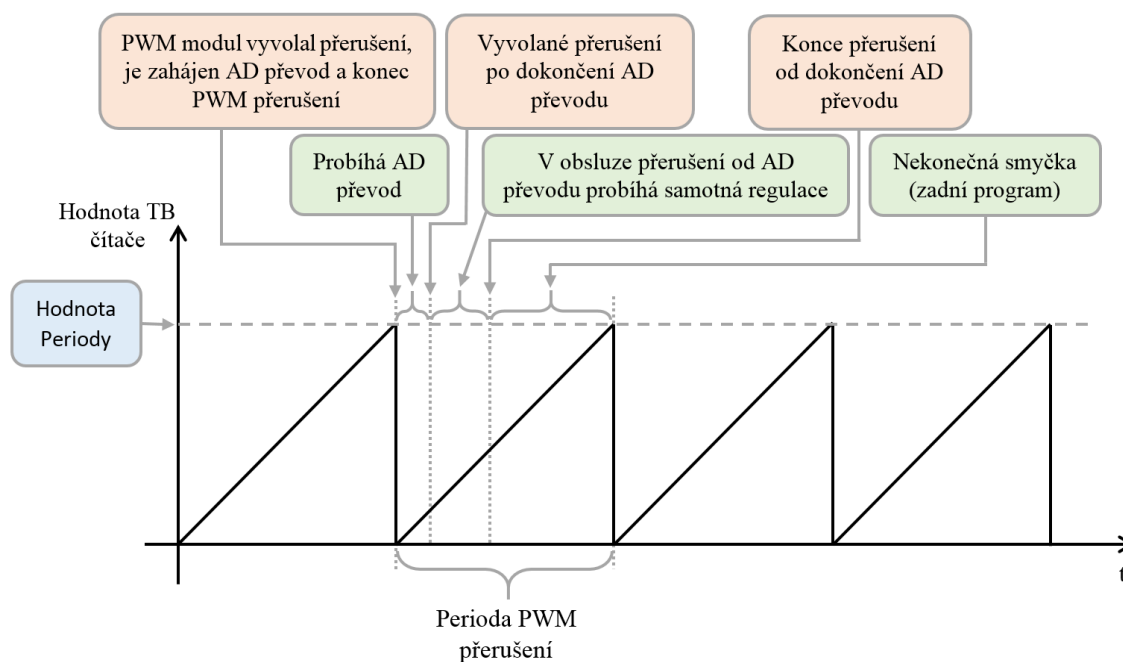
- **TB** – v časové základně TB je generován signál pilovitého tvaru (strmost pili je určena vstupní frekvencí do bloku TB a nastavenou hodnotou v děliči frekvence). Hodnota TBPRD určuje cílovou hodnotu (periodu) čítače CTR. Čítač CTR je nastaven do funkce čítání nahoru. CTR využívá stínové registry, kvůli zaručení správného okamžiku přepsání nové hodnoty TBPRD registru. V registru TBCTL lze nastavit synchronizaci s předešlým PWM modulem (v našem případě je synchronizovaný druhý modul s prvním a třetí modul s druhým). Fázový posun je mezi PWM moduly nastaven na hodnotu 0.
- **CC** – hodnoty v registrech CMPA a CMPB jsou neustále porovnávány s hodnotou registru TBCTR. Zápis hodnot CMPA a CMPB je proveden pomocí stínových registrů. Pokud dojde ke komparaci, CC modul provede změny stavů signálu na svých výstupech.

- **AQ** – modul vyhodnocení signálů z CC a TB modulů detekuje požadavky na změnu hodnot výstupů PWM modulu. Tato změna výstupních signálů je ovlivněna:
  - Signálem dočítání TB čítače do hodnoty PRD.
  - Signálem dočítání TB čítače do hodnoty 0. (aplikováno)
  - Signálem rovnosti registru CMPA = CTR.
  - Signálem rovnosti registru CMPB = CTR.
- **DB** – aby nedošlo k sepnutí obou tranzistorů jedné fáze (a následného zkratu) jsou v tomto modulu nastaveny bezpečnostní doby.
- **PC** – tento modul umožní rozstřídání výstupního PWM signálu na vysokou frekvenci. Využívá se toho při realizaci propojení PWM výstupu s pulzním transformátorem (v této práci je modul vypnut).
- **ET** – modul událostí a přerušení je nastaven tak, aby vygeneroval přerušení po rovnosti hodnoty nastavené periody TBPRD a TBCTL. Zároveň je nastaveno, že v obsluze přerušení PWM dojde k zapnutí AD převodu.
- **TZ** – externí vstupy do tohoto modulu slouží k zablokování výstupních PWM pulzů. Uplatňuje se toho během nebezpečný stavů polovodičových spínačů detekovaných budičem (nadproud, přetížení, přepětí, přehřátí, zkrat, ...)

Inicializace PWM modulů dochází při spuštění programu. Mimo uvedené parametry je dále nastaveno, že jsou tranzistory aktivní v logické 0. [7, 8]

## 4.2.2 Průběh zobrazující práci PWM modulu

Na Obrázku 11. je popsán časový průběh práce modulu PWM. Je znázorněno, kdy je vyvoláno jaké přerušení, a co po daném přerušení program dělá.



Obrázek 11. Popsaný průběh událostí signálového procesoru

Hodnota periody je číslo v registru, které se porovnává s aktuální hodnotou v čítači TB. Tuto hodnotu lze uživatelem měnit, podle požadované frekvence vzorkování (regulace). Když dojde ke komparaci zadané hodnoty periody a aktuální hodnoty v čítači TB, vyvolá se přerušení od PWM modulu. PWM modul je nastaven tak, že pokud vygeneruje přerušení dočítáním čítače TB do hodnoty periody, zahájí se převod AD převodníkem a vyskočí z PWM přerušení. Během AD převodu je program v části nekonečné smyčky a zpracovává zadní program (není znázorněno v obrázku, protože je to velice krátký čas). Dojde-li následně k přerušení od dokončení AD převodu, provede program samotnou regulaci motoru. V této části se upraví změřený signál vstupující do AD převodníku, provedou se potřebné výpočty k realizované metodě přímého řízení momentu (popsáno v další podkapitole 4.3), poslání vybraných dat na DA převodníky a samotné nastavení zvoleného následujícího napětíového vektoru na PWM výstupy (polovodičové spínače). Po provedení regulace motoru nastává konec obsluhy přerušení od AD převodu. Následující čas procesoru je věnován zadnímu programu. Zadní program obsahuje pouze detekci, jestli je požadavek pro rozběh/stop motoru a pokud nedošlo ke změně požadované frekvence vzorkování  $f_{VZ}$  (regulace). Procesor se pohybuje v zadním programu, dokud nedojde k dalšímu přerušení od

PWM modulu a celá již uvedená struktura se takto periodicky opakuje zadanou frekvencí.

Jedinou nezmíněnou funkcí procesoru v této aplikaci je, jak probíhá komunikace s uživatelským rozhraním spuštěným v Labview. Zobrazovaná data ve vytvořeném uživatelském rozhraní jsou periodicky čtena přímo z paměti procesoru. Frekvence obnovy dat je 100 ms, aby zbytečně nedocházelo k zatěžování komunikace mezi DSP a PC. Dojde-li v uživatelském rozhraní ke změně kteréhokoli parametru uživatelem, je tato změna proměnné provedena bezprostředně ihned i v paměti procesoru (pokud nezapočítáme zpoždění PC a komunikace). Tuto minimální odezvu zaručuje funkce procesoru přímého přístupu do paměti (DMA).

### 4.3 Přerušení od dokončení převodu AD převodníkem

Celá regulace motoru Takahashiho metodou přímého řízení momentu probíhá v této části programu. Následuje popis kroků v algoritmu:

- Změřené napětí meziobvodu  $U_d$  je průměrováno z šestnácti vzorků a následně normováno.
- Změřené proudy dvou fází motoru  $i_{Sa}$  a  $i_{Sb}$  jsou také normovány.
- Kontrola, zda je požadavek k regulaci motoru (tlačítko „Rozběh“).
- Detekce přepětí meziobvodu a nadproudu  $i_{Sa}$  a  $i_{Sb}$ . Pokud dojde k těmto nebezpečným stavům, budou PWM výstupy bezprostředně vypnuty.
- Převod pomocí Clarkové transformace fázových proudů motoru  $i_{Sa}$  a  $i_{Sb}$  na statorové složky proudu  $i_{Sa}$  a  $i_{Sb}$  (rovnice 2.1.12).
- Rekonstrukce složek napětí  $u_{1\alpha}$  a  $u_{1\beta}$  z vybraného napětového vektoru a změřeného napětí meziobvodu  $U_d$  (tabulka 2.)
- Výpočet statorových složek  $\psi_\alpha$  a  $\psi_\beta$  statorového magnetického toku (rovnice 2.1.10 a 2.1.11).
- Výpočet modulu statorového magnetického toku  $|\psi_S|$  (rovnice 2.1.7)
- Výpočet skutečného momentu motoru  $M$  (rovnice 2.1.13)
- Vyhodnocení směru otáčení rotoru ze znaménka hodnoty žádaného momentu.
- Hysterezní regulátor statorového magnetického toku vyhodnocuje požadavek pro snížení/zvýšení statorového magnetického toku  $SQ$ . Regulace probíhá v hysterezním pásmu, které je dáno parametrem  $HQ$ .
- Hysterezní regulátor momentu motoru vyhodnocuje požadavek pro snížení/zvýšení momentu motoru  $ST$ . Regulace probíhá v hysterezním pásmu, které je dáno parametrem  $HM$ .

- Z aktuálních hodnot  $\psi_\alpha$ ,  $\psi_\beta$  a  $|\psi_s|$  je dopočítán sektor, ve kterém se nachází vektor statorového magnetického toku  $\underline{\psi}_1^S$ .
- Z aktuálních hodnot směru otáčení rotoru, požadavku ST, požadavku SQ a sektoru ve kterém se nachází vektor statorového magnetického toku, je vypočítán (výběr v tabulce 4.) následující napěťový vektor.
- Podprogram nabuzení – pokud bude aktivována tato funkce, dojde vždy před samotným rozběhem motoru k jeho nabuzení. Nabuzení je provedeno přepínáním jednoho aktivního a nulového napěťového vektoru až do okamžiku dosažení žádaného statorového magnetického toku. Funkce omezuje špičky fázových proudů způsobené tím, že se statorové vinutí (v prvním okamžiku připojení napájecího napětí a bez namagnetizovaného rotoru) chová jako zkrat.
- Vyhodnocení rovnosti směru otáčení vektoru statorového magnetického toku a směru otáčení rotoru motoru.
- Podprogram korekce překmitu momentu – reverzace motoru ve vyšších otáčkách způsobuje překmit momentu motoru vlivem použití nulových napěťových vektoru a nerovnosti směru otáčení vektoru statorového magnetického toku a rotoru motoru. Dojde-li k požadavku reverzace momentu motoru, je výběr napěťových vektorů prováděn z tabulky, složené pouze z aktivních napěťových vektorů. Po dosažení rovnosti směru vektoru statorového magnetického toku a rotoru motoru dojde k přepnutí na spínací tabulku obsahující i napěťové vektory nulové (tabulka 4.). Tímto algoritmem je nežádoucí překmit momentu ošetřen.
- Nastavení výstupních PWM modulu na požadovanou spínací kombinaci (dle vybraného napěťového vektoru).
- Konec obslužného programu přerušení od dokončení AD převodu.

## 5 GRAFICKÉ ROZHRAŇÍ V LABVIEW

Pro jednoduché, komfortní a praktické ovládání technologie, přístroje nebo stroje se používají uživatelské grafické rozhraní (GUI). Toto rozhraní komunikuje s daným systémem a může provádět zásahy do algoritmu regulace nebo zobrazovat selektované hodnoty proměnných a stavů. V této kapitole bude přiblížena funkčnost GUI, která umožňuje ovládat motor algoritmem metody přímého řízení momentu.

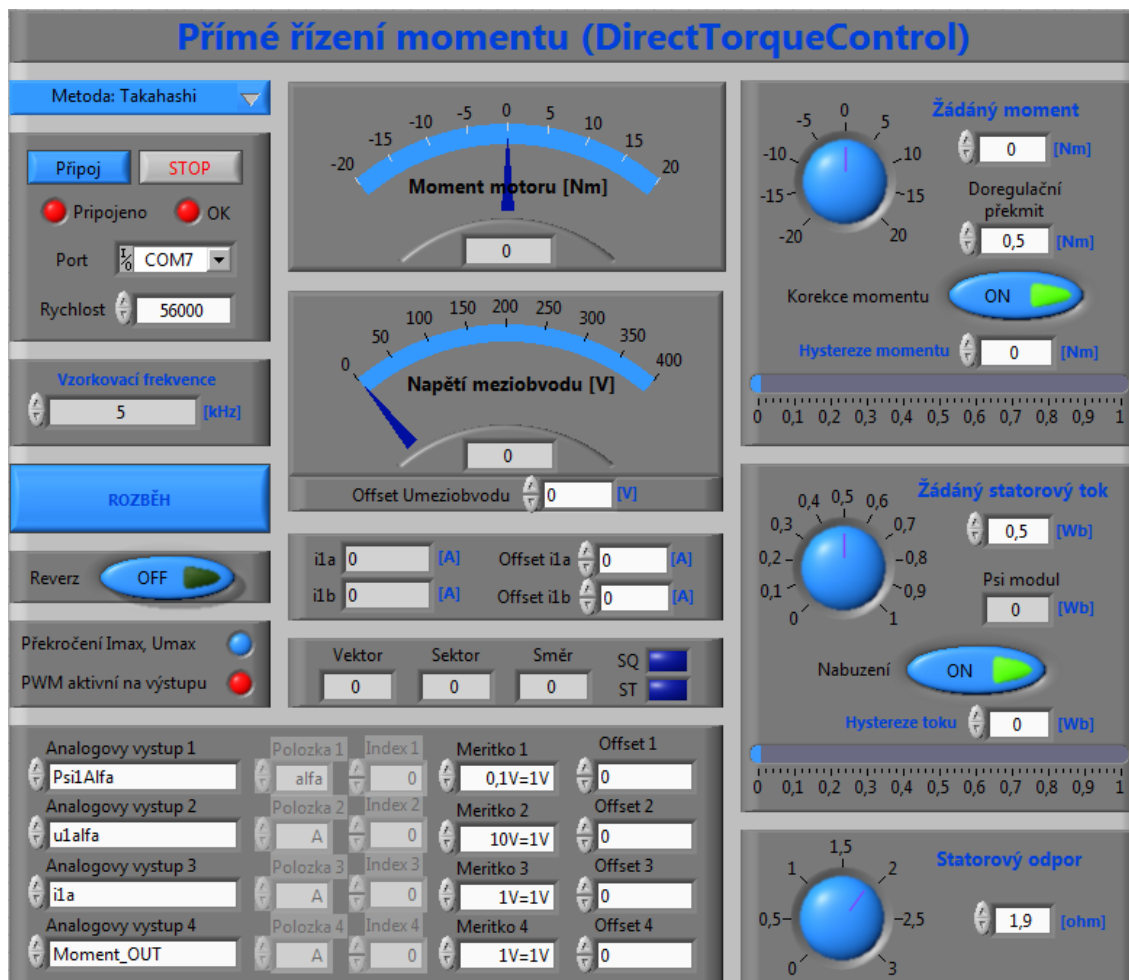
### 5.1 Popis programu v LabView

Před připojením k řídící elektronice měniče je nutné nastavení komunikačního portu a jeho rychlosti. Je zde i stav připojení, a zda komunikace probíhá v pořádku. Popis jednotlivých prvků GUI na Obrázku 12.:

- Výběr požadované vzorkovací frekvence (2 kHz, 5 kHz, 10 kHz a 20 kHz).
- Výběr požadované metody přímého řízení momentu
- Tlačítko „ROZBĚH/STOP“, pro spuštění regulace motoru.
- Tlačítko „Reverz“, pomocí kterého dojde k reverzaci motoru na žádaný moment s opačným znaménkem.
- Zobrazení skutečného momentu.
- Zobrazení měřeného napětí meziobvodu s možností úpravy SW offsetem.
- Zobrazení měřených proudů  $i_{1a}$  a  $i_{1b}$  s možností úpravy SW offsetem.
- Nastavení požadovaného momentu.
- Tlačítko „Korekce momentu“, které povolí funkci omezení překmitu momentu při reverzaci motoru. Princip spočívá v tom, že jsou použity při reverzaci pouze aktivní napěťové vektory.
- Nastavení hodnoty „Doregulační překmit“, která určuje povolenou hodnotu překmitu momentu během reverzace.
- Nastavení hodnoty „Hystereze momentu“. Tato hodnota určuje hysterezní pásmo pro hysterezní regulátor momentu motoru.
- Nastavení žádaného statorového magnetického toku.
- Zobrazení modulu skutečného statorového magnetického toku  $|\psi_s|$ .
- Tlačítko „Nabuzení“, pro povolení nabuzování motoru před samotným zahájením regulace momentu.



- Nastavení hodnoty „Hystereze toku“. Tato hodnota určuje hysterezní pásmo pro hysterezní regulátor statorového magnetického toku motoru.
- Nastavení hodnoty „Statorový odpor“ dle parametrů daných výrobcem.
- Zobrazení stavu „Překročení  $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$ “, upozorňující na nadproud fází motoru a přepětí meziobvodu.
- Zobrazení stavu „PWM aktivní na výstupu“, poukazující, zda jsou výstupní PWM pulzy povoleny.
- Zobrazení hodnot „Vektor“, „Sektor“ a „Směr“ s kterými algoritmus aktuálně pracuje.
- Zobrazení stavu požadavků snížení/zvýšení momentu motoru „ST“ a požadavku snížení/zvýšení statorového magnetického toku „SQ“.
- Přiřazení požadovaných až čtyř proměnných na analogové výstupy. Pokud se jedná o pole proměnných, lze vybrat index v poli. Rovněž je zde nastavení měřítka pro výstupní analogový signál a možnost offsetu



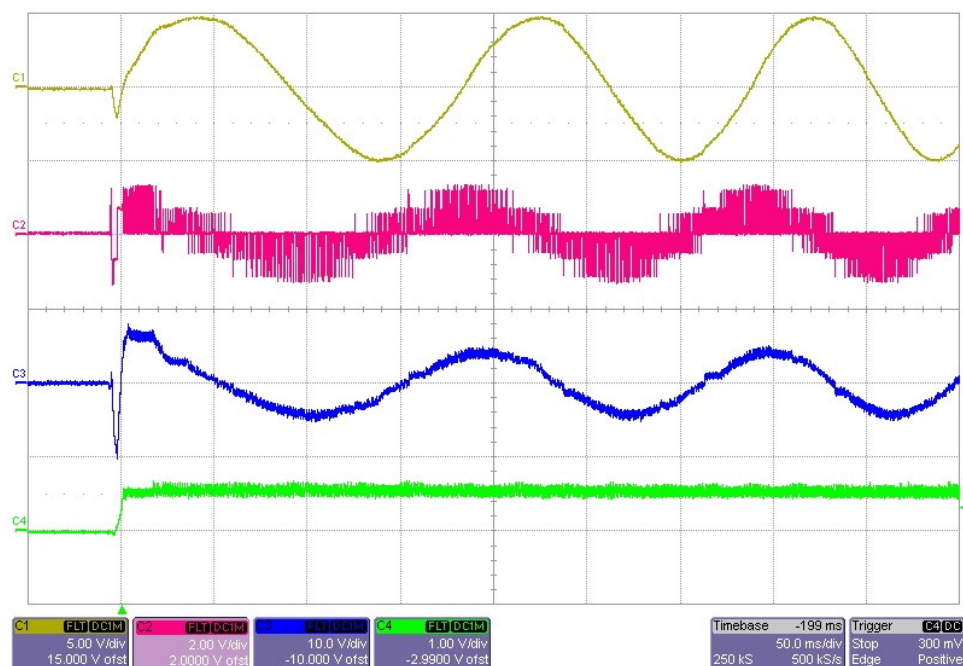
Obrázek 12. Grafické uživatelské rozhraní vytvořené v programu Labview pro ovládání motoru

## 6 OVĚŘENÍ ČINNOSTI REALIZOVANÉHO ALGORITMU

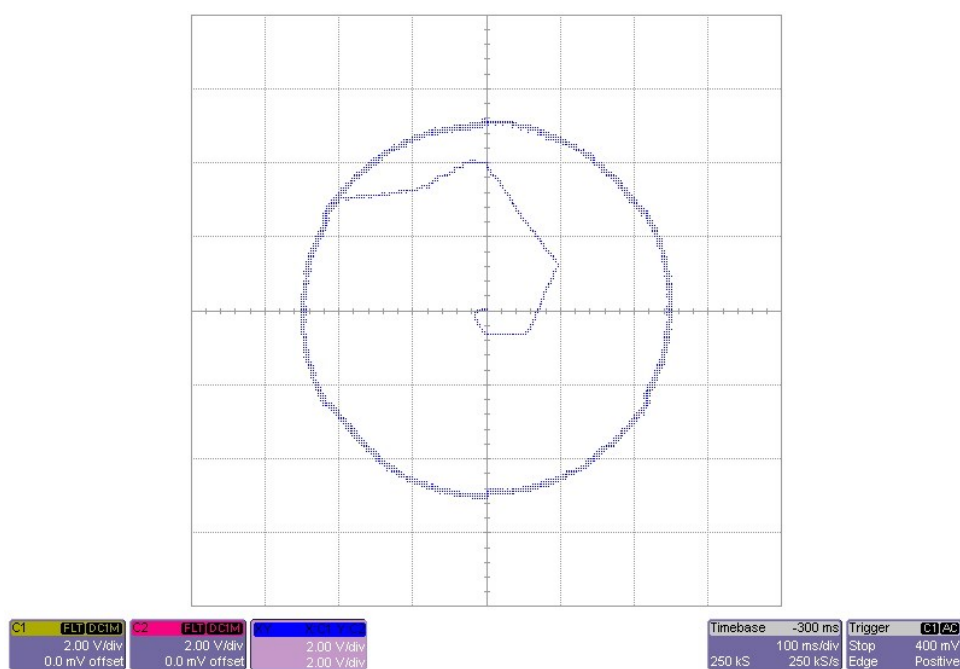
V této kapitole jsou zobrazeny a popsány průběhy nejdůležitějších veličin motoru. K zobrazení byl použit čtyř kanálový osciloskop (LeCroy wave surfer 424). Měřené veličiny byly snímány osciloskopickými sondami přímo z DA výstupu analogové karty měniče. Ve všech případech regulace motoru byla hodnota napětí meziobvodu  $U_d = 200 \text{ V}$  (při regulaci docházelo k nepatrnému poklesu hodnoty napětí z důvodu, že měnič není napájen z dostatečně tvrdého zdroje). Během měření všech těchto průběhů byl motor dostatečně zatížen, aby se skutečná hodnota momentu pohybovala v hysterezním pásmu okolo žádané hodnoty momentu. V popisu jednotlivých obrázků jsou uvedeny informace o požadovaném momentu  $M_z$ , vzorkovací periodě  $f_{vz}$ , zapnutých pomocných funkcí pro regulaci motoru a popis kanálů osciloskopu s měřítkem. Osciloskop je nastaven tak, aby odfiltroval rušení ze vstupního signálu pomocí digitálního filtru.

### 6.1 Rozběh motoru

Rozběhem asynchronního motoru s kotvou nakrátko metodou přímého řízení vznikají nežádoucí proudové překmity (obrázek 13.). Překmity jsou způsobené tím, že se ve chvíli připojení napájecího napětí na svorky motoru chová statorové vinutí jako činný odpor. Po nabuzení rotorového vinutí a otáčení rotoru má statorový proud téměř sinusový tvar. Tvar trajektorie koncového bodu vektoru statorového magnetického toku  $\underline{\psi}_1^S$  při rozběhu motoru je proto spirálovitý (obrázek 14.). K dosažení požadovaného momentu se při rozběhu motoru používají kromě aktivních napět'ových vektorů i napět'ové vektory nulové.

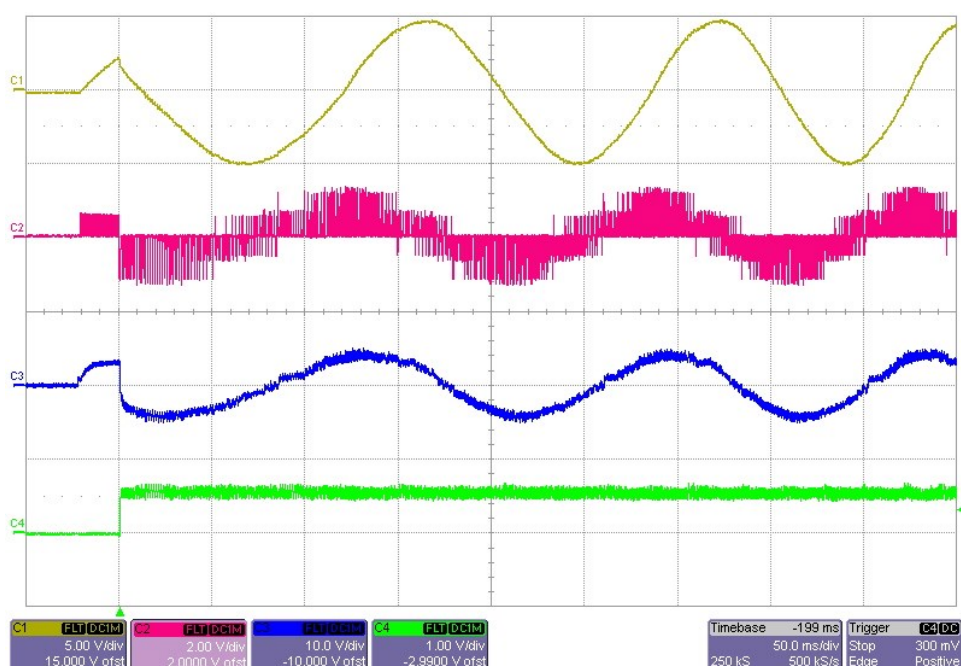


Obrázek 13. Veličiny motoru při rozběhu bez aktivní funkce nabuzování ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 10 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ ,  $0,5 \text{ Wb/d}$ , kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ ,  $200 \text{ V/d}$ , kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ ,  $10 \text{ A/d}$ , kanál 4.:  $M$ ,  $10 \text{ Nm/d}$ )



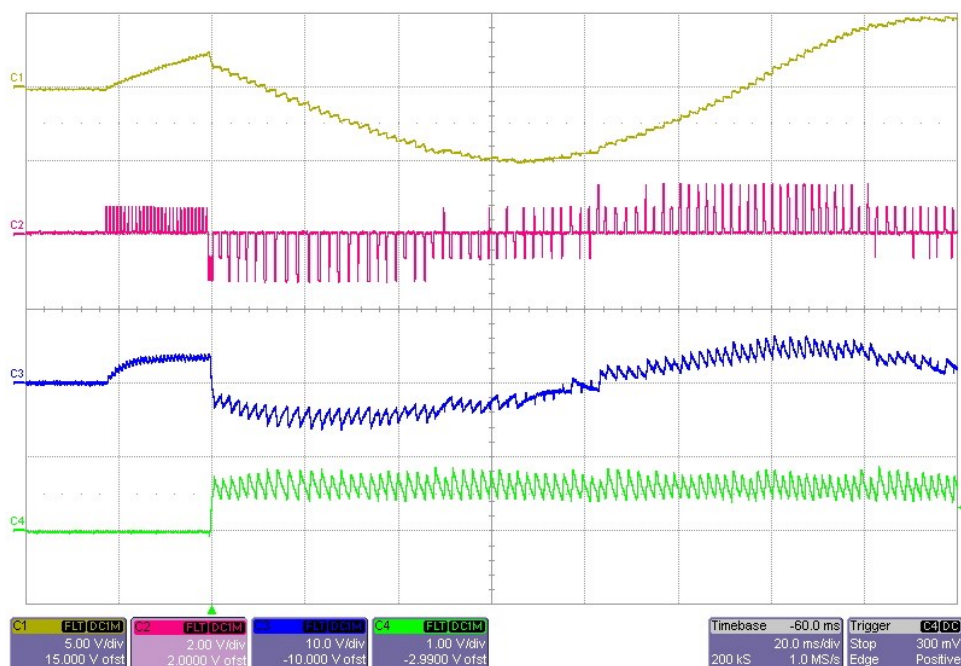
Obrázek 14. Trajektorie koncového bodu vektoru statorového magnetického toku  $\underline{\Psi}_1^S$  zobrazená ve statorovém souřadnicovém systému během rozběhu motoru bez použité funkce nabuzování. ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 10 \text{ kHz}$ )

Problematicu překmitu proudu během rozběhu motoru lze vyřešit správným nabuzením motoru před jeho spuštěním. Nabuzování probíhá pulsním přepínáním jednoho aktivního vektoru napětí a jednoho nulového vektoru napětí. Toto nabuzování probíhá do chvíle dosažení žádaného satorového magnetického toku. Následuje zapnutí regulace metodou přímého řízení momentu. Na obrázku 15. a 16. je zachycen tvar veličin motoru při zapnuté funkci rozběhu motoru s nabuzením pro různé vzorkovací frekvence  $f_{VZ}$ . Ověření funkčnosti algoritmu rozběhu motoru s aktivní funkcí nabuzení pro záporný moment je zachycena na obrázku 17. a trajektorie koncového bodu vektoru satorového magnetického toku  $\underline{\psi}_1^S$ , která má během nabuzování tvar přímky (z důvodu konstantní střídý spínání aktivního a nulového napětíového vektoru) na obrázku 18.

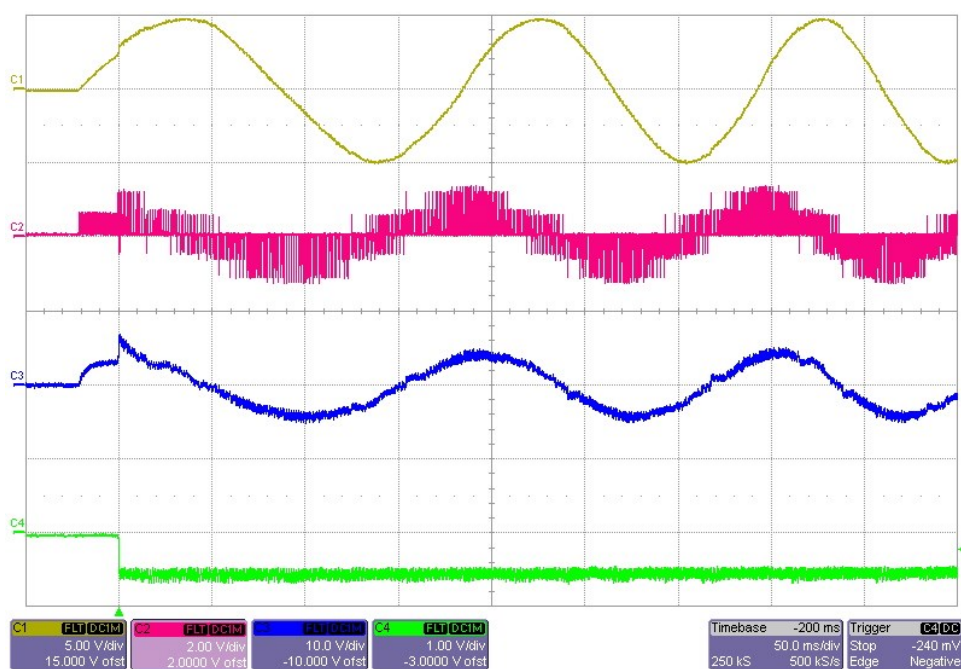


Obrázek 15. Veličiny motoru při rozběhu s aktivní funkcí nabuzování ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{VZ} = 10 \text{ kHz}$ ).

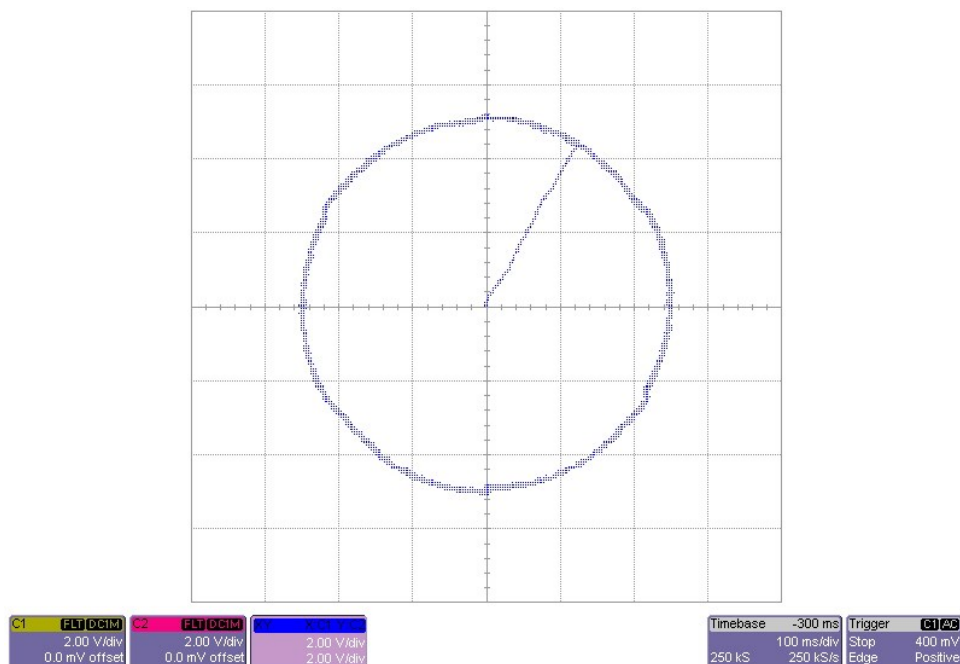
(kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)



Obrázek 16. Detail veličin motoru při rozběhu s aktivní funkcí nabuzování ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 5 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)



Obrázek 17. Detail veličin motoru při rozběhu s aktivní funkcí nabuzování ( $M_z = -5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 10 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)

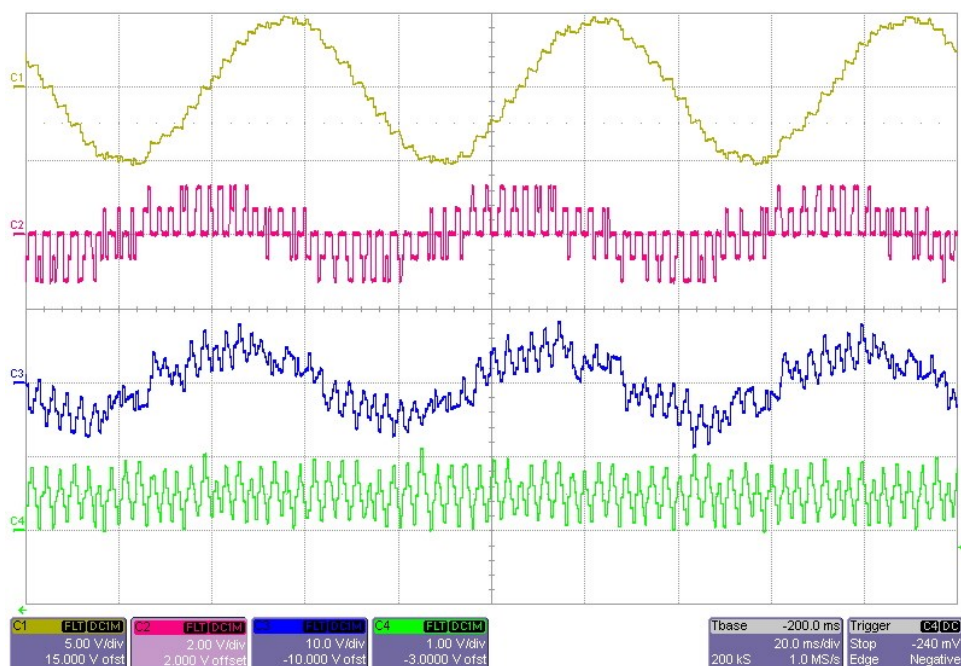


Obrázek 18. Trajektorie koncového bodu vektoru statorového magnetického toku  $\underline{\Psi}_1^S$  zobrazená ve statorovém souřadnicovém systému během rozběhu motoru s aktivní funkcí nabuzování. ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{VZ} = 10 \text{ kHz}$ )

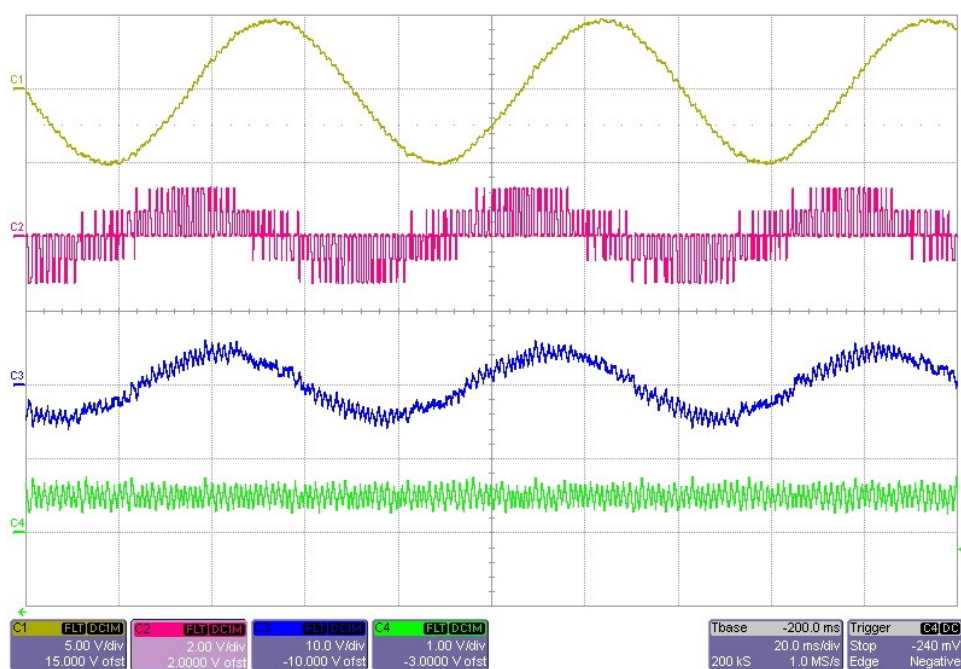
## 6.2 Zatěžování motoru

Zobrazené průběhy veličin v této části se týkají ustáleného běhu motoru při konstantním zatížení. Ze zachyceného tvaru napětí  $u_{1\alpha}$  (kanál 2.) si lze povšimnout, že dochází ke spínání aktivních i nulových napěťových vektorů (tvar napětí se blíží k sinusovému průběhu). Skutečný moment  $M$  (kanál 4.) je mírně rozvlněn z důvodu hysterezní regulace momentu motoru (rovněž s rostoucí vzorkovací frekvencí  $f_{VZ}$  dochází ke zmenšování rozvlnění momentu motoru). Kanál 3. zobrazuje průběh statorového proudu jednou fází  $i_{1\alpha}$ , který se tvarem blíží k sinusovému průběhu (závislé na vzorkovací frekvenci  $f_{VZ}$ ).



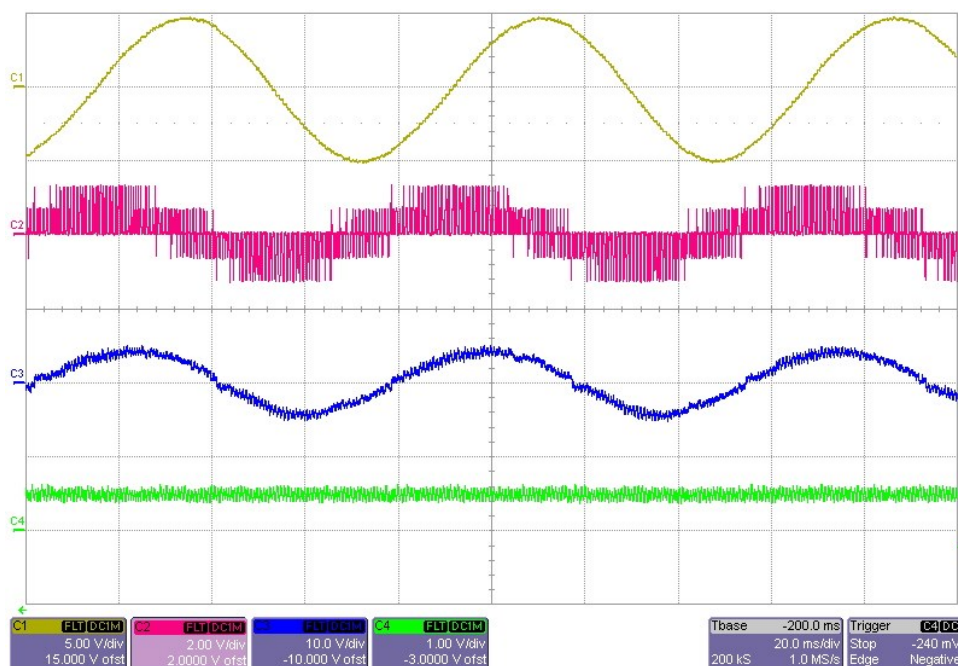


Obrázek 19. Veličiny motoru při ustáleném stavu a konstantním zatížení motoru ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 2 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ ,  $0,5 \text{ Wb/d}$ , kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ ,  $200 \text{ V/d}$ , kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ ,  $10 \text{ A/d}$ , kanál 4.:  $M$ ,  $10 \text{ Nm/d}$ )



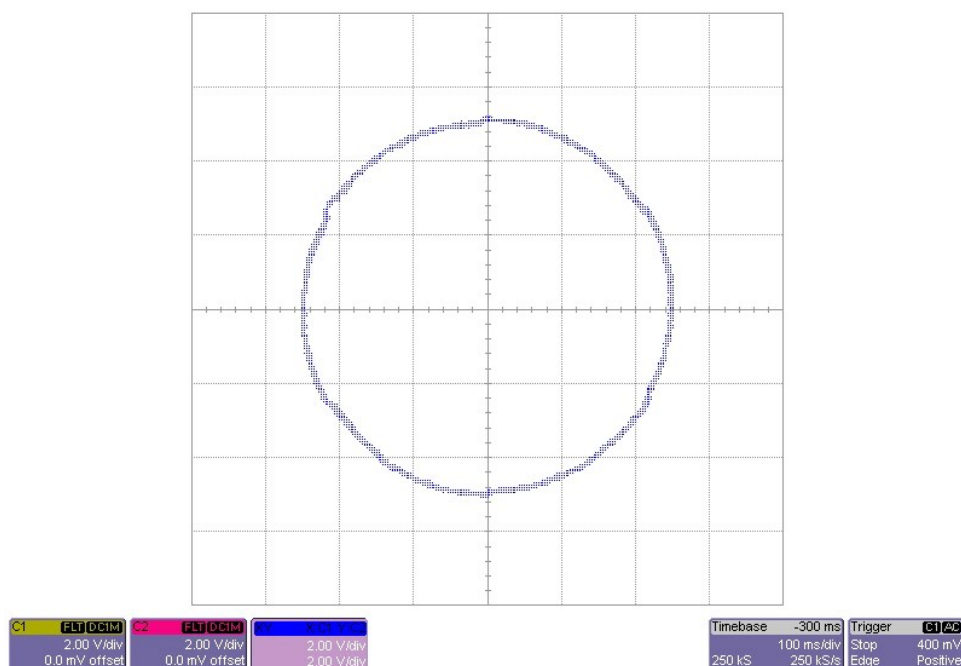
Obrázek 20. Veličiny motoru při ustáleném stavu a konstantním zatížení motoru ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 5 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ ,  $0,5 \text{ Wb/d}$ , kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ ,  $200 \text{ V/d}$ , kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ ,  $10 \text{ A/d}$ , kanál 4.:  $M$ ,  $10 \text{ Nm/d}$ )





Obrázek 21. Veličiny motoru při ustáleném stavu a konstantním zatížení motoru ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 10 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)

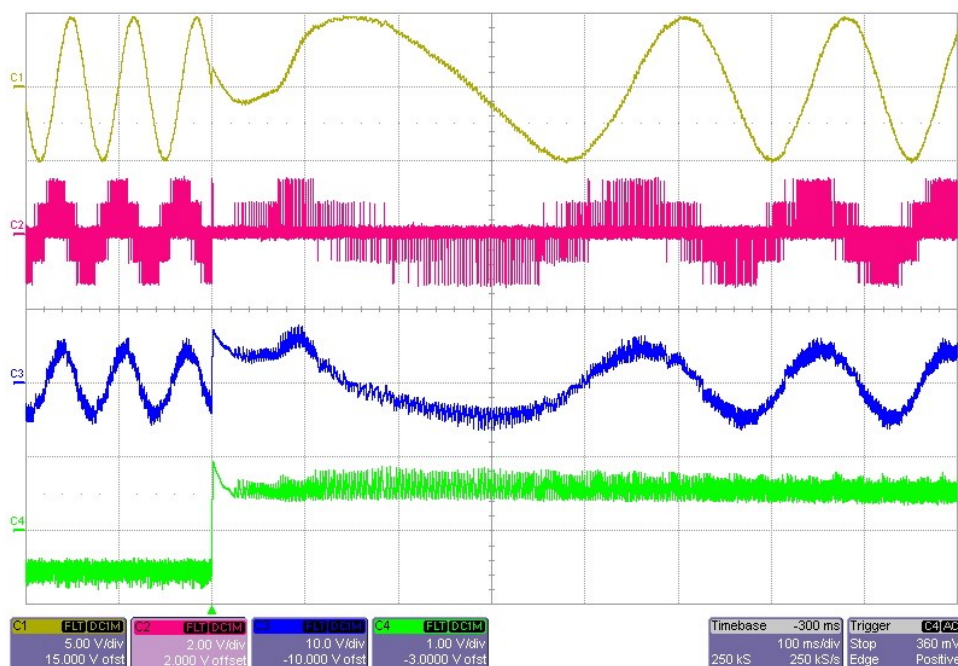
Následující obrázek 22. zobrazuje trajektorii koncového bodu vektoru statorového magnetického toku  $\underline{\psi}_1^S$  opisující kružnici (s drobnými výchylkami) při konstantním zatížení motoru. Tyto výchylky se projevují změnou sektoru během rotace vektoru statorového magnetického toku.



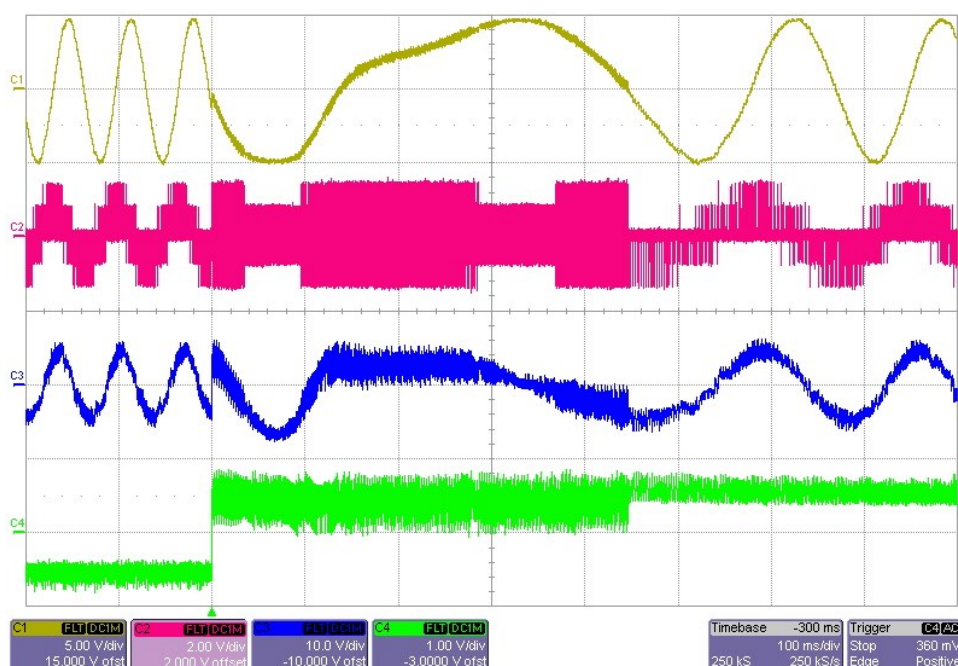
Obrázek 22. Trajektorie koncového bodu vektoru statorového magnetického toku  $\underline{\Psi}_1^S$  zobrazená ve statorovém souřadnicovém systému. ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{VZ} = 10 \text{ kHz}$ )

### 6.3 Reverzace motoru

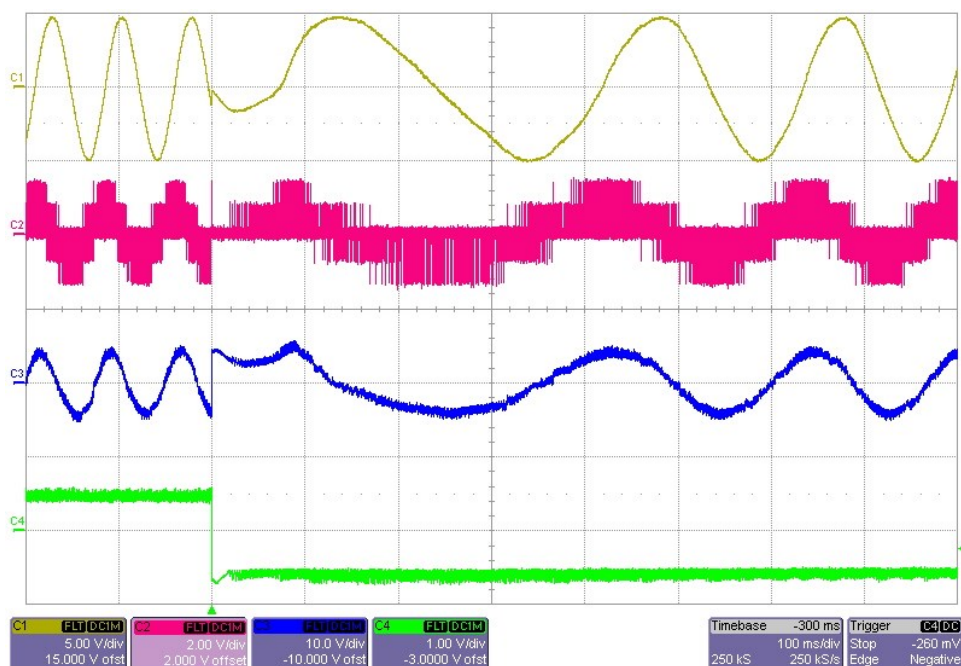
Během reverzace motoru může vzniknout nežádoucí překmit momentu motoru, vlivem spínání nulových napětových vektorů při dosažení žádaného opačného momentu motoru. Výskyt tohoto překmitu je závislý na době než dojde k vyrovnání směrů otáčení vektoru statorového magnetického toku a rotoru motoru. Uvedenému problému se předchází tím, že se aktivuje funkce „korekce momentu“, která zaručí, že budou spínány pouze aktivní napětové vektory, dokud nedojde k již zmíněné rovnosti směrů otáčení vektoru statorového magnetického toku a rotoru motoru. Na obrázku 23. a 25. si lze povšimnout překmitu momentu během reverzace momentu. Průběh napětí  $u_{1\alpha}$  (kanál 2.) je složen pouze z nulových napětových vektorů (v prvním okamžiku reverzace momentu) a tím je i způsoben momentový překmit. Po aktivaci korekce překmitu momentu (obrázek 24. a 26.) dochází ke spínání pouze aktivních napětových vektoru. Tento jev je viditelný na tvaru napětí  $u_{1\alpha}$ .



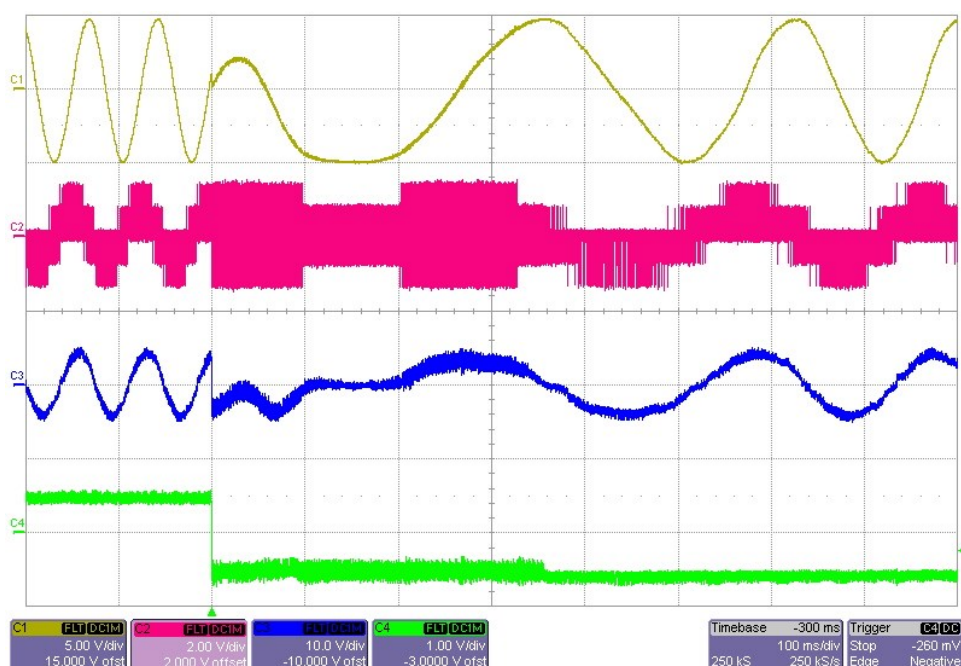
Obrázek 23. Veličiny motoru během reverzace momentu při konstantním zatížení motoru bez aktivované funkce korekce momentu ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 5 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)



Obrázek 24. Veličiny motoru během reverzace momentu při konstantním zatížení motoru s aktivovanou funkcí korekce momentu ( $M_z = 5 \text{ Nm}$ ,  $f_{vz} = 5 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)



Obrázek 25. Veličiny motoru během reverzace momentu při konstantním zatížení motoru bez aktivované funkce korekce momentu ( $M_z = -5 \text{ Nm}$ ,  $f_{VZ} = 10 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)



Obrázek 26. Veličiny motoru během reverzace momentu při konstantním zatížení motoru s aktivovanou funkcí korekce momentu ( $M_z = -5 \text{ Nm}$ ,  $f_{VZ} = 10 \text{ kHz}$ ). (kanál 1.:  $\Psi_{1\alpha}$ , 0,5 Wb/d, kanál 2.:  $u_{1\alpha}$ , 200 V/d, kanál 3.:  $i_{1\alpha}$ , 10 A/d, kanál 4.:  $M$ , 10 Nm/d)

## 7 ZAVĚR

Při tvorbě diplomové práce jsem nabyl mnoho nových zkušeností a především si vyzkoušel aplikaci teorie v praxi. Během řešení této práce bylo nutné využít znalosti z oblasti konstrukce asynchronních motorů, teorie metod přímého řízení momentu, správného použití HW a SW zvoleného DSP a práci s grafickým uživatelským rozhraním v programu LabView. Výskyt problémů byl především v částech práce týkajících se nastavení PWM modulů, komunikace LabView GUI s DSP a optimalizace kódu. Problémy byly zdárně odstraněny během testování v laboratoři, a mé znalosti v oblasti problematiky se prohloubily.

V první polovině práce se nachází teoretický rozbor Takahashiho metody přímého řízení momentu motoru a popis stanoviště. Také jsou zde umístěny aplikované výpočty důležitých proměnných, vycházející z parametrů motoru a měniče. V samotném středu práce jsem nastínil strukturu napsaného kódu pro DPS v jazyce C. Vyskytuje se zde i detailnější popis nastavení PWM modulů. Poslední část diplomové práce řeší ověření Takahashiho DTC metody z naměřených průběhů v laboratoři.

Zobrazené průběhy nejdůležitějších naměřených veličin potvrzují teorii Takahashiho metody přímého řízení momentu. Jsou zde ukázány přechodné děje, jako je nabuzování motoru před samotným rozběhem, reverzace momentu s korekcí překmitu momentu a také pohyb koncového bodu vektoru statorového magnetického toku po trajektorii ve tvaru kružnice.

Dalším vývojem této práce by mohla být implementace dalších metod přímého řízení momentu (uvedených v kapitole 2.), vytvoření knihovny funkcí z vytvořených částí programu (z hlediska znovupoužití v jiné aplikaci např. funkci nabuzování a funkci korekce překmitu momentu při reverzaci) a optimalizace kódu pro DSP.

# LITERATURA

- [1] HRDINA, Libor. Disertační práce: *Metody přímého řízení momentu asynchronních motorů*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 104 stran. [cit. 12.3.2016].
- [2] BRANDŠTETTER, Pavel. *Elektrické regulovatelné pohony III.*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2012, 201 stran. [cit. 18.4.2016].
- [3] ŻELECHOWSKI, Marcin. Disertační práce: *Space Vector Modulated – Direct Torque Controlled (DTC – SVM) Inverter – Fed Induction Motor Drive*, Warsaw University of Technology, Warsaw – Poland, 2005, 175 stran. [online]. [cit. 15.4.2016]. Dostupné na www: < [http://ufnalski.edu.pl/zne/pimedeo/rozprawy/M\\_Zelechowski.pdf](http://ufnalski.edu.pl/zne/pimedeo/rozprawy/M_Zelechowski.pdf) >
- [4] GAJDUŠEK, Pavel. *Přehled metod řízení asynchronního motoru* [článek], Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT v Brně, Brno, 2005. [cit. 10.3.2016]. Dostupné na www: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05020/index.html>>
- [5] JURČO, Dominik. Diplomová práce: *Mikropočítačový řídicí systém se signálovým procesorem TMS320F28335*, VŠB-TU Ostrava, 2014, 45 stran. [cit. 12.3.2016].
- [6] GELNAR, Lukáš. Diplomová práce: *Laboratorní stanoviště se střídavými regulovanými pohony*, VŠB-TU Ostrava, 2015, 52 stran. [cit. 18.3.2016].
- [7] Datasheet. TEXAS INSTRUMENTS, TMS320F28335/F28334/F28332/F28235/F28234/F28232 Digital Signal Controllers (Rev. M). [online]. [cit. 21.3.2016]. Dostupné na www: < <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=tms320f28335&fileType=pdf> >
- [8] Datasheet. TEXAS INSTRUMENTS, TMS320x2833x, 2823x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Reference Guide (Rev. A). [online]. [cit. 22.3.2016]. Dostupné na www: < <http://www.ti.com/lit/ug/sprug04a/sprug04a.pdf> >
- [9] Datasheet. CONCEPT, Six-pack SCALE Driver 6SD106EI for IGBTs and Power MOSFETs. [online]. [cit. 26.3.2016]. Dostupné na www: <[https://igbt-driver.power.com/system/files\\_force/product\\_document/data\\_sheet/6SD106EI.pdf](https://igbt-driver.power.com/system/files_force/product_document/data_sheet/6SD106EI.pdf)>
- [10] Datasheet. SEMIKRON, SEMITRANS IGBT Modul SKM 75 GB 123 D. [online]. [cit. 2.4.2016]. Dostupné na www: < <http://www2.scut.edu.cn/scutco/maindoc/techtrade/Pdevice/semikron/documents/datasheet/s/igbt/123/SKM75GB123D.pdf> >
- [11] Datasheet. SEMIKRON, Power Bridge Rectifiers SKD 50. [online]. [cit. 2.4.2016]. Dostupné na www: < <http://descargas.cetronic.es/SKD5012.pdf> >

# SEZNAM PŘÍLOH

A) Zdrojový kód pro DPS (Code Composer Studio)

CD-ROM

B) Ovládací panel (Labview)

CD-ROM